RAPPORT DE RECHERCHE

ORIFICES DE VENTILATION, ASSÈCHEMENT PAR VENTILATION ET MODÉRATION DE LA PRESSION

SCHL CMHC

AU COEUR DE L'HABITATION

Canada

SCHL—Au cœur de l'habitation

La Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL) est au cœur de l'habitation. Toutes ses activités visent à aider les Canadiens et les Canadiennes à vivre dans un logement sûr à tout point de vue.

À titre d'organisme national responsable du logement, la SCHL joue un rôle important dans le secteur canadien de l'habitation. Elle propose de nouvelles façons de financer l'achat des maisons. Elle favorise l'innovation dans le domaine de la technologie et de la conception des habitations. Grâce à son assurance prêt hypothécaire, elle aide les Canadiens et les Canadiennes à réaliser leur rêve et à posséder leur propre maison.

Les Canadiens et les Canadiennes tirent avantage de la collaboration de la SCHL avec ses partenaires des secteurs public, privé et sans but lucratif en vue d'améliorer la qualité et l'accessibilité des logements et de faire en sorte qu'ils soient plus abordables, partout au pays.

L'aide accordée par la SCHL permet aux ménages à faible revenu, aux aînés, aux personnes handicapées et aux Autochtones de vivre dans des logements convenables et abordables. La SCHL crée des emplois pour les Canadiens et les Canadiennes dans le domaine des produits et services en aidant le secteur de l'habitation à exporter ses connaissances et ses compétences dans d'autres pays.

Les recherches de pointe effectuées par la SCHL améliorent la qualité des logements et font en sorte que ceux-ci soient plus abordables. Afin d'aider les Canadiens et les Canadiennes à tirer profit de son savoir-faire dans le domaine de l'habitation et à prendre des décisions éclairées, la SCHL est devenue le plus important éditeur canadien de publications portant sur le logement. Elle possède également la collection la plus complète de documents sur l'habitat.

Les Canadiens et les Canadiennes peuvent avoir facilement accès à nos informations par l'entremise des points de vente et des bureaux régionaux de la SCHL.

Vous pouvez aussi communiquer avec nous par téléphone :
1 800 668-2642 [à l'extérieur du Canada : (613) 748-2003]
ou par télécopieur : (613) 748-4069.
Pour nous joindre en direct, visitez notre page d'accueil à l'adresse suivante : « www.cmhc-schl.gc.ca »

La Société canadienne d'hypothèques et de logement appuie la politique du gouvernement fédéral sur l'accès à l'information pour les personnes handicapées. Si vous désirez obtenir la présente publication en des médias substituts, composez le 1 800 668-2642.

ORIFICES DE VENTILATION, ASSÈCHEMENT PAR VENTILATION ET MODÉRATION DE LA PRESSION

Par Eric Burnett et John Straube

Building Engineering Group (BEG)
Département de génie civil
University of Waterloo
Waterloo (Ontario) N2L 3G1

Décembre 1995

Agent de projet de la SCHL : Pierre-Michel Busque

Ce projet a été exécuté grâce à une subvention accordée par la Société canadienne d'hypothèques et de logement dans le cadre du Programme de subventions de recherche (dossier CR 7585-B102 de la SCHL). Les opinions sont celles des auteurs et ne représentent pas les opinions officielles de la Société.

Issued also in English under the title: ***Vent, Ventilation Drying, and Pressure Moderation.***

100-06190/

La Société canadienne d'hypothèques et de logement, l'organisme d'habitation du gouvernement fédéral, est responsable de l'administration de la *Loi nationale sur l'habitation*.

Cette loi est conçue pour favoriser l'amélioration des logements et des conditions d'habitation au Canada. Par conséquent, la Société a des intérêts dans tous les aspects de la promotion immobilière et du développement urbain, ainsi que de la croissance et du développement en général.

En vertu de la Partie IX de la Loi, le gouvernement du Canada subventionne la SCHL pour lui permettre de mener des recherches sur les aspects socio-économiques et techniques de l'habitation et des domaines connexes, et d'entreprendre la publication et la distribution des résultats de ces recherches. Par conséquent, la SCHL a la responsabilité statutaire de mettre à la disposition du public des renseignements pouvant être utiles en vue d'améliorer les conditions d'habitation et de vie.

Cette publication est l'un des nombreux documents publiés par la SCHL avec l'aide de fonds fédéraux.

Avertissement

La présente étude a été menée par le Building Engineering Group, University of Waterloo, pour la Société canadienne d'hypothèques et de logement, en vertu de la Partie IX de la *Loi nationale sur l'habitation*. L'analyse, l'interprétation et les recommandations sont celles des experts-conseils et ne reflètent pas nécessairement les opinions de la SCHL ni des divisions de celle-ci ayant contribué à la présente étude et à sa publication.

Remerciements

Bon nombre de personnes et d'organismes ont rendu ce rapport et les travaux expérimentaux possibles grâce à leur soutien, à leur participation et à leur coopération.

Il convient de remercier la Société canadienne d'hypothèques et de logement pour avoir financé cette recherche, et plus particulièrement Pierre-Michel Busque, le gestionnaire de projet, pour son soutien, sa compréhension, son apport et sa patience.

Ewart Brundrett et Kari Feldmann ont tous deux consacré de nombreuses heures à examiner le projet de rapport initial et à proposer des améliorations; le résultat final est de loin beaucoup plus clair et précis en raison de leur participation. Les critiques constructives de Gus Handegord ont également contribué à améliorer le contenu et la clarté du rapport.

Il faut également reconnaître l'aide et la collaboration des techniciens du laboratoire des structures de génie civil de l'University of Waterloo, c'est-à-dire Dick Powers, Ralph Korchensky et Terry Ridgeway.

Executive Summary

Background

The orientation, size, and nature of vents in screened exterior wall systems are important to wall performance because these characteristics affect venting, ventilation and pressure moderation. The ventilation of screened wall systems has received very little attention in Canadian building research. With funding from CMHC's External Research Program, the Building Engineering Group at the University of Waterloo undertook an experimental and theoretical study of vents and venting in screened walls. The **objective** of this study was to define the problems and potentials, develop upper and lower bounds of likely performance, and provide some theory and complementary experimental measurements as a precursor to future more detailed and directed studies. The scope of the study extended to all screened and vented exterior wall systems. Masonry veneer walls were of special interest because of their wide use and the special importance of ventilation to this type of wall.

Literature Review

Codes, standards and previous research relating to vents and ventilation in wall systems have been reviewed and summarized. European codes are generally more specific regarding the size and location of vents and require much higher vent areas than North American code requirements. Most of the relevant wall cavity ventilation research has been conducted in Europe. A review of the limited available literature which reports the field measurement of ventilation indicated that very well vented wall systems (vent areas of more than 1% of wall area) typically experienced flow velocities of 0.1 to 0.2 m/s. Despite the extensive use of ventilated cladding systems in Europe, the benefits, drawbacks, and mechanics of ventilation flow have not been clearly defined. Moreover, very little work has been done on masonry veneer wall systems.

Theoretical Considerations

Ventilating the space behind the cladding with outdoor air offers two major benefits:

- relatively dry outside air flow allows evaporative drying of the inside face of the cladding and outside face of the inner wythe, and
- water vapour diffusing through the inner wythe can bypass the vapour diffusion resistance of the cladding and be carried outside.

The heat capacity of air is so limited that unless there are very high air flow, little heat can be carried out of the air space. For most of the time in most enclosure walls, the effect of ventilation will not affect the insulation value of the air space. Very small air flows can, however, transport significant quantities of moisture. The cavity in many walls is usually

warmer and contains more moisture than the outdoor air. Therefore, even small ventilation flows have the potential to remove moisture.

Forces Driving Ventilation Flow

Ventilation is driven by a combination of wind pressures, thermal buoyancy and moisture buoyancy. It can be shown that temperature and wind pumping in wall cavities with only one vent opening will provide less than 1% as much air flow as the flow generated between two vents. The provision of vent openings at both the top and bottom of the cavity will generally allow the most ventilation. The study therefore concentrated on wall systems with vents or slots placed at the top and bottom of the cavity.

Wind pressure is the most important force driving ventilation flow. For most Canadian locations, the wind blows 90% of the time, but the average wind velocity is generally quite low (3-4 m/s at 10 m above grade). Low-rise houses will often be protected from wind (by neighbouring buildings and by their location near the ground) but mid- and high-rise buildings will often be fully exposed to the wind. Average wind pressures driving ventilation on low-rise buildings can be expected to be in the order of 1 Pascal, but there the average will fall in a wide range between 0.1 and 10 Pascals, depending the geometry and size of the building, the location and distance between vents, and wind speed and wind direction.

Increasing temperature and water vapour content decrease the density of air; these changes in density generate buoyancy effects that can drive ventilation air flow. Temperature and moisture buoyancy are likely to be of almost equal significance. Because of solar heating and outward heat flow in winter, the cavity of typical walls can be expected to be an average 3 to 5 °C warmer than ambient over the entire year. Daily variations of 15 to 20 °C above ambient can be expected. Pressures in the order of 1 Pascal can be expected due to the combined effects of moisture and temperature buoyancy. These pressures can, in mathematical terms, be relatively accurately defined given some knowledge of the temperature and moisture conditions within the cavity.

Ventilation Flow Rates

A review of the literature of air flow through cavities was also conducted. The roughness of the cavity sides is not very important in practical walls, but the partial blockage of the cavity by mortar fins, strapping, bulging insulation, displaced building paper, etc. can be very important; large cavity widths are suggested as a means to overcome these potential blockages. In wall systems with discrete vents (e.g. masonry veneers), the vents impose the large majority of the resistance to air flow. Therefore, increasing the vent area will have a direct improvement on the air flow through the cavity. European open-jointed panel cladding systems will generally permit in order of magnitude more air flow than typical masonry veneer wall systems because of their large vent areas and clear cavities.

The flow generated by typical driving pressures (0.5 to 2 Pascals) can be expected to be in the order of 0.05 to 0.5 litres per second per m^2 of cladding depending on the vent area and the depth and degree of blockage of the cavity.

Ventilation Drying Rates

Outside air almost always has a lower vapour pressure than the air in the cavity, especially if the sides of the cavity are wet. Therefore, ventilation air flow can remove moisture from both the back of the cladding and the outer surface of the inner wythe by evaporation. Thus, ventilation drying can increase the drying potential of a wall system. Drying the inside of a brickwork veneer from the outside face only can be a slow process. Saturated materials in the inner wythe can also be dried much more quickly with the aid of ventilation air flow than by diffusion through the cladding.

Evaporation and drying due to air flow were also examined with the aid of available physics. It was found that air flows of the order of 0.05 to 0.5 litres per second per m^2 of cladding can remove from 10 to 1000 g of moisture per day per m^2 from behind the screen, depending on the exterior environment. Ventilation drying will be about ten times greater in July than January.

Cladding materials such as brick, concrete, natural stone, vinyl, metal and wood have a low water vapour permeance. In fact, all of these materials are sufficiently vapour impermeable to be classed as Type 2 vapour barriers or better. The drying of wet parts of an assembly will be greatly restricted by these claddings because evaporated moisture cannot diffuse through the cladding. Condensation can be expected to occur on the inside face of such cladding. However, it can be shown that exceptionally small ventilation rates (0.1 $l/m^2 \cdot s$) will greatly increase the effective vapour permeance of otherwise vapour impermeable claddings. For claddings such as vinyl and steel, ventilation may be the major contributor to their observed successful field performance. The reduction in vapour resistance due to ventilation air flow can be easily calculated using a concept, developed in the report, called equivalent permeance.

In some situations, excessive ventilation may cause wetting of the backside of cladding. Night-sky radiation can cause cooling of the cladding below ambient temperatures especially for thermally lightweight cladding (e.g. vinyl, metal). This can allow condensation on the cladding to occur. However, for claddings that store sufficient quantities of heat, the potential for ventilation-induced condensation is small because the temperature is almost always above ambient due to stored solar heat and outward heat flow. The influence of increasing vent areas on increased driving rain penetration also requires considerations.

Laboratory Vent Flow Tests

Airflow through vents under both static and dynamic pressures was studied in a series of laboratory experiments. Idealized vents (sharp-edged orifices), model head joints, and commercially available masonry veneer vent inserts were examined. It was found that all of the

commercially available masonry veneer vent inserts that were tested greatly restricted flow. The flow through these inserts ranged from 1 to 15% of the flow through an open head joint.

Testing also showed that for steady or slowly-varying air-flow calculations, standard (10 x 65 x 90 mm deep) open head joints in masonry veneers can be considered to behave as orifices with a flow coefficient of 0.65 and a flow exponent of 0.55. Idealized orifices closely follow the power law, with a flow exponent of 0.5 and a flow coefficient of about 0.61.

In all cases, the flow under dynamically-varying pressure differences was higher than under static pressures but the actual flow could not be predicted using the standard orifice flow equations used for steady pressure differences. The velocity distribution that typically forms under steady pressure differences likely did not have sufficient time to form in the dynamic pressure tests and this resulted in the higher measured flows.

Field Pressure Measurements

Wind pressures have the greatest potential to drive ventilation flow, but the influence of wind speed, wind direction, and vent separation is difficult to quantify. To help assess the complicated interaction of the variables, the pressures on a rectangular low-rise building were monitored continuously for six weeks. The pressure difference between the vents in five different configurations was recorded every second. The wind speed and wind direction were also recorded.

A statistical analysis of the data indicated that ventilation pressures of 1 Pascal often occurred, but that the pressures were quite variable. Although wind direction plays an important role, even the leeward side of the building experienced significant ventilation pressures.

Conclusions and Recommendations

Ventilation, even small amounts, can provide significant benefits to wall performance, mostly by contributing to the removal of moisture from behind the screen. If unobstructed cavities and several strategically located large vents are provided in a screened wall, significant ventilation air flow can occur, even with the very small driving pressures that typically occur in service. The same measures will allow for the moderation of wind-induced pressure differences across the screen.

Laboratory testing of air flow through proprietary masonry vent inserts show that these inserts greatly reduce ventilation flow. The flow of air through vents driven by dynamic pressure variations is greater, sometimes significantly so, than when driven by a static pressure difference.

Designing new or the retro-fit of existing wall systems that encourage ventilation flow can greatly increase the drying potential of a wall assembly. In masonry veneer construction, it is recommended that minimum venting, i.e., an open head joint every 600 mm o.c. *at the top and*

bottom of a 2.5 m high cavity or 0.2% of the wall area, should be provided. To achieve significant benefits from pressure moderation and ventilation drying, at least three times this area (0.6% of wall area) should be provided. To ensure clear cavities (which encourage good ventilation and allow drainage), the minimum width of the air space should be 30 mm, preferably a width of 40-50 mm should be provided.

Despite the benefits of ventilation flow, very little is known and it is recommended that a judicious mix of theoretical modelling, lab experiments, and field monitoring should be undertaken.

Résumé

Contexte

L'orientation, les dimensions et la nature des orifices de ventilation aménagés dans les écrans pare-pluie sont importantes pour la performance des murs, car ces caractéristiques agissent sur le mouvement de l'air, la ventilation et la modération de la pression. La ventilation des écrans pare-pluie a reçu très peu d'attention par les chercheurs en bâtiment canadiens. C'est ainsi que, grâce à des fonds obtenus dans le cadre du Programme de subvention de recherche de la SCHL, le *Building Engineering Group* de l'University of Waterloo a entrepris une étude expérimentale et théorique des orifices de ventilation et du mouvement de l'air à l'intérieur des écrans pare-pluie. Cette étude avait pour **objectif** de définir les problèmes et les possibilités d'application, d'établir les limites supérieures et inférieures de la performance probable ainsi que de fournir une certaine théorie et des mesures expérimentales complémentaires devant servir de fondement à des études ultérieures plus poussées et plus circonscrites. L'étude a porté sur tous les types d'écrans pare-pluie et de murs extérieurs ventilés. Les placages de maçonnerie présentaient un intérêt particulier parce qu'ils sont très répandus et parce que la ventilation revêt une importance appréciable dans ce genre de mur.

Recherche documentaire

Nous avons étudié et résumé les codes, les normes et les recherches antérieures traitant des orifices de ventilation et de la ventilation des murs. Les codes européens sont généralement plus précis en ce qui concerne les dimensions et l'emplacement des orifices de ventilation et exigent de plus grandes surfaces de ventilation que les codes nord-américains. La plupart de la recherche pertinente portant sur la ventilation des cavités murales a été menée en Europe. Un examen de la documentation limitée faisant état de mesures de ventilation prises sur le terrain révèle que les murs très bien ventilés (surface de ventilation supérieure à 1 % de la surface murale) présentent des débits de 0,1 à 0,2 m/s. Toutefois, en dépit de l'utilisation très répandue, en Europe, des parements ventilés, leurs avantages, leurs inconvénients et la mécanique de la ventilation n'ont pas été clairement définis. En outre, les placages de maçonnerie ont été très peu étudiés.

Aspects théoriques

Le fait de ventiler avec de l'air extérieur la cavité qui se trouve derrière le parement comporte deux avantages importants :

- la circulation d'air extérieur relativement sec permet l'assèchement par évaporation de la face intérieure du parement et de la face extérieure de la paroi interne;
- la vapeur d'eau diffusée à travers la paroi interne peut être évacuée à l'extérieur malgré la résistance du parement à la diffusion de la vapeur.

La capacité thermique de l'air est si limitée qu'à moins d'avoir un débit d'air très élevé, il ne peut y avoir une grande déperdition de chaleur hors de la cavité. La plupart du temps, et pour la plupart des écrans pare-pluie, la ventilation n'a aucun effet sur le degré d'isolation thermique de la lame d'air.

De très faibles débits d'air peuvent, néanmoins, transporter d'importantes quantités d'humidité. Pour bien des murs, la cavité est habituellement plus chaude et renferme plus d'humidité que l'air extérieur. Par conséquent, même de faibles débits de ventilation peuvent extraire de l'humidité.

Forces produisant la ventilation

La ventilation se produit grâce à l'effet conjugué des pressions du vent, de la poussée thermique et de la poussée de l'humidité. On peut démontrer que la température et le vent qui s'infiltre dans les cavités de murs pourvus d'un seul orifice de ventilation produisent un débit d'air équivalent à moins de 1 % de celui qu'ils créent entre deux orifices. C'est pourquoi l'aménagement d'orifices de ventilation en partie supérieure et inférieure de la cavité permettra généralement une ventilation optimale. L'étude a donc porté uniquement sur les murs dotés d'orifices de ventilation ou de chantepleures au haut et au bas de la cavité.

La pression du vent est la force la plus importante qui favorise la ventilation. Au Canada, en général, le vent souffle 90 % du temps, mais sa vitesse moyenne est habituellement très faible (entre 3 et 4 m/s, à 10 m au-dessus du sol). Les maisons de faible hauteur sont souvent protégées du vent (soit par les bâtiments voisins ou par le fait qu'elles sont près du sol), mais les bâtiments de moyenne et de grande hauteur sont souvent entièrement exposés au vent. Les pressions du vent moyennes qui assurent la ventilation des bâtiments de faible hauteur sont sans doute de l'ordre de 1 pascal, mais la moyenne varie largement dans une gamme comprise entre 0,1 pascal et 10 pascals, selon la géométrie et la taille du bâtiment, son emplacement et la distance entre les orifices de ventilation, la vitesse du vent et sa direction.

L'élévation de la température et l'augmentation de la teneur en vapeur d'eau diminuent la masse volumique de l'air. Ces variations de masse volumique produisent des poussées qui peuvent entraîner un mouvement d'air de ventilation. La poussée de la température et de l'humidité revêtent probablement une importance presque équivalente. En raison de la chaleur du soleil et de l'exfiltration de chaleur en hiver, on peut prévoir que la cavité d'un mur moyen soit de quelque 3 à 5 °C plus chaude que la température ambiante pour l'année entière. Des variations quotidiennes de 15 à 20 °C au-dessus de la température ambiante sont probables. Des pressions de l'ordre de 1 pascal sont à prévoir en raison de l'effet conjugué de la poussée de la température et de l'humidité. Ces pressions peuvent, en termes mathématiques, être définies assez précisément quand on connaît les conditions de température et d'humidité à l'intérieur de la cavité.

Débits de ventilation

Nous avons également examiné la documentation existant sur le mouvement d'air dans les cavités. La rugosité des parois à l'intérieur des cavités n'est pas très importante dans la réalisation proprement dite des murs, mais l'obturation partielle de la cavité par les bavures de mortier, les fourrures, l'isolant saillant, le papier de construction déplacé, etc. peut revêtir une très grande importance. Nous suggérons donc d'aménager de larges cavités pour prévenir les obturations potentielles. Dans les murs à orifices de ventilation distincts (placages de maçonnerie, p. ex.), ce sont les orifices qui opposent le plus de résistance au mouvement de l'air. C'est pourquoi, en augmentant la surface de ventilation, on obtient une amélioration directe du mouvement de l'air dans la cavité. Les panneaux de parement européens à joint ouvert permettent généralement un

meilleur mouvement d'air (par un ordre de grandeur de 1) que les placages de maçonnerie traditionnels en raison de leur grande surface de ventilation et de leurs cavités libres.

Le mouvement d'air créé par les écrans de pression (de 0,5 à 2 pascals) peuvent être de l'ordre de 0,05 à 0,5 litre par seconde par m^2 de parement selon la surface de ventilation, la profondeur de la cavité et le degré d'obstruction de celle-ci.

Taux d'assèchement par ventilation

L'air extérieur a presque toujours une tension de vapeur plus faible que l'air de la cavité, surtout si les parois de la cavité sont humides. Par conséquent, un mouvement d'air de ventilation peut enlever l'humidité, par évaporation, tant de la face intérieure du parement que de la surface extérieure de la paroi interne. L'assèchement par ventilation peut donc accroître le potentiel de séchage d'un mur. Assécher l'intérieur d'un placage de brique à partir de la face extérieure ne peut qu'être lent. Les matériaux saturés dans la paroi interne peuvent également être asséchés plus rapidement par ventilation que par diffusion à travers le parement.

Nous avons aussi examiné l'évaporation et l'assèchement par mouvement d'air au moyen des données physiques disponibles. Nous avons constaté que des mouvements d'air de l'ordre de 0,05 à 0,5 litre par seconde par m^2 de parement peuvent éliminer de l'arrière de l'écran de 10 à 1 000 g d'humidité par jour par m^2, selon la nature du milieu extérieur. L'assèchement par ventilation est environ 10 fois supérieur en juillet par rapport à janvier.

Les matériaux de parement comme la brique, le béton, la pierre naturelle, le vinyle, le métal et le bois ont une faible perméance à la vapeur d'eau. En fait, tous ces matériaux sont suffisamment imperméables à la vapeur pour recevoir un classement « Type 2 » ou mieux comme pare-vapeur. Ces parements entravent grandement l'assèchement des parties humides d'un assemblage parce que l'humidité qui s'évapore ne peut pas s'échapper par le parement. Il faut donc s'attendre à la formation de condensation sur la face intérieure de ce genre de parement. Or, on peut démontrer qu'un débit de ventilation exceptionnellement faible (0,1 $l/m^2 \cdot s$) peut augmenter sensiblement la perméance à la vapeur effective de parements normalement imperméables à la vapeur. Dans le cas de parements comme le vinyle et l'acier, la ventilation peut constituer le facteur le plus important de leur bonne performance en service. La réduction de la résistance à la vapeur grâce à la ventilation peut facilement être calculée au moyen d'un concept, expliqué dans le rapport, que nous appelons la perméance équivalente.

Dans certaines situations, une ventilation excessive peut entraîner le mouillage de la face intérieure du parement. Le rayonnement lumineux du ciel nocturne peut refroidir le parement à une température inférieure à la température ambiante, surtout en ce qui concerne les parements légers (comme le vinyle et le métal). Ce phénomène peut se traduire par la formation de condensation sur le parement. Toutefois, dans le cas des parements qui emmagasinent suffisamment de chaleur, la possibilité que de la condensation se forme à cause de la ventilation est mince puisque la température est presque toujours supérieure à la température ambiante en raison de l'accumulation de chaleur solaire et de l'exfiltration de chaleur. Il faut également tenir compte du fait qu'en augmentant la surface de ventilation, on risque de favoriser une infiltration accrue de la pluie poussée par le vent.

Essais en laboratoire du passage de l'air dans les orifices de ventilation

Nous avons étudié le passage de l'air, par pression statique et dynamique, dans les orifices de ventilation lors d'une série d'expériences en laboratoire. Nous avons pour ce faire utilisé des orifices idéaux (à rebords aigus), des joints verticaux modèles ainsi que des pièces préfabriquées, vendues dans le commerce, à encastrer dans les orifices de ventilation des placages de maçonnerie. Nous avons découvert que toutes les pièces préfabriquées à encastrer étudiées entravent de beaucoup le passage de l'air. Il s'est avéré que ces pièces laissent passer de 1 à 15 % de la quantité d'air qui passe par les joints verticaux ouverts.

Les essais ont également démontré que, pour les calculs de mouvements d'air constants ou à variation lente, les joints verticaux ouverts standards (10 x 65 x 90 mm) ménagés dans les placages de maçonnerie peuvent être considérés comme ayant un comportement similaire à celui d'orifices possédant un coefficient de débit de 0,65 et un exposant de débit de 0,55. Les orifices idéaux suivent de près la loi de puissance [$Q = Cd \cdot A \cdot \left(\frac{2\Delta P}{\rho}\right)$], présentant un exposant de débit de 0,5 et un coefficient de débit d'environ 0,61.

Dans tous les cas, le débit soumis à des écarts de pression à variation dynamique était plus élevé que lorsqu'il était soumis à des pressions statiques. Cependant, le débit réel n'a pas pu être prévu au moyen des équations standard de débit des orifices utilisés pour déterminer les différences de pression constantes. La répartition de vitesses qui se produit habituellement à des différences de pression constantes n'a probablement pas eu le temps de se réaliser lors des essais de pression dynamique et les débits mesurés ont donc été plus élevés.

Mesures de la pression sur le terrain

Les pressions du vent risquent le plus de susciter la ventilation, mais l'effet de la vitesse, de la direction et de la séparation des orifices est difficile à quantifier. C'est ainsi que, pour évaluer les interactions complexes de ces variables, nous avons mesuré en continu les pressions subies par un bâtiment rectangulaire de faible hauteur pendant six semaines. Nous avons enregistré à chaque seconde l'écart de pression entre des orifices de cinq configurations différentes et nous avons mesuré la vitesse et la direction du vent.

Une analyse statistique des données a révélé que des pressions de ventilation de 1 pascal étaient fréquentes, mais que les pressions étaient très variables. Bien que la direction du vent joue un rôle important, même le côté sous le vent du bâtiment a subi d'importantes pressions de ventilation.

Conclusions et recommandations

La ventilation, même très faible, peut comporter d'importants avantages pour la performance des murs, principalement en contribuant à évacuer l'humidité emprisonnée derrière l'écran pare-pluie. Si l'on aménage une cavité exempte d'obstructions pour un écran pare-pluie bénéficiant de plusieurs orifices de ventilation de bonne dimension placés à des endroits stratégiques, il est alors possible d'obtenir un important débit d'air de ventilation, même lorsque les écarts de pression sont

légers, ce qui est souvent le cas en service. Les mêmes dispositions permettent de modérer l'effet des différences de pression causées par le vent sur toute la surface de l'écran.

Les essais en laboratoire menés sur des pièces préfabriquées à encastrer dans les orifices de ventilation montrent que ces produits réduisent considérablement le débit de ventilation. L'air poussé dans les orifices par les variations de pression dynamique a un débit plus élevé, parfois dans une très large mesure, que lorsqu'il est poussé par une différence de pression statique.

La conception de nouveaux murs ou la réfection de murs existants favorisant la ventilation peut accroître considérablement le potentiel d'assèchement d'un mur. Pour la construction de placages de maçonnerie, on suggère d'aménager un minimum d'orifices de ventilation, soit un joint vertical ouvert tous les 600 mm *en partie supérieure et inférieure* d'une cavité de 2,5 m de hauteur, c'est-à-dire 0,2 % de la surface murale. Pour bénéficier des avantages importants que représentent la modération de la pression et l'assèchement par ventilation, il faut prévoir une surface au moins trois fois supérieure (0,6 % de la surface murale). Pour faire en sorte que les cavités soient libres (ce qui favorise une bonne ventilation et permet le drainage), la cavité devrait avoir une largeur minimale de 30 mm et, de préférence, une largeur de 40 à 50 mm.

Malgré les avantages qu'offre la ventilation, on en sait très peu sur le sujet et nous recommandons de procéder à un judicieux mélange de modélisation expérimentale, d'expériences en laboratoire et d'essais en service.

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction
- 1.1 Contexte 1.1
- 1.2 Objectifs 1.1
- 1.3 Envergure 1.1
- 1.4 Approche 1.2
- 1.5 Murs : définition et catégorisation 1.2
- 1.6 Murs à circulation d'air, ventilés et à modération de pression 1.6
  - 1.6.1 Modèles de murs européens 1.6
  - 1.6.2 Modèles de murs canadiens 1.6
  - 1.6.3 Différences entre les modèles canadiens et européens 1.8
- 1.7 Codes et règlements 1.10
- 1.8 Recherches antérieures 1.12

2. Orifices et circulation d'air dans les orifices de ventilation
- 2.1 Types d'orifices 2.1
- 2.2 Circulation d'air dans les orifices de ventilation : théorie de base 2.3
- 2.3 Tests de pression statique dans les orifices 2.4
  - 2.3.1 Objectif 2.4
  - 2.3.2 Appareils 2.4
  - 2.3.3 Procédure 2.7
  - 2.3.4 Résultats 2.9
- 2.4 Tests de pression dynamique dans les orifices 2.14
  - 2.4.1 Objectifs 2.14
  - 2.4.2 Appareils 2.14
  - 2.4.3 Procédure 2.18
  - 2.4.4 Résultats 2.18
  - 2.4.5 Discussion 2.20

3. Forces motrices de la ventilation
- 3.1 Effets thermiques 3.1
  - 3.1.1 Poussée thermique (effet cheminée) 3.1
  - 3.1.2 Pompage thermique 3.4
- 3.2 Effets du vent 3.6
  - 3.2.1 Relevés sur place 3.12
  - 3.2.2 Gradients spatiaux moyens 3.14
  - 3.2.3 Variations spatiales dynamiques 3.21
  - 3.2.4 Pompage par le vent 3.23
- 3.3 Autres forces 3.26
  - 3.3.1 Pressions intérieures 3.26
  - 3.3.2 Poussée de l'humidité 3.27

4. Mécanique du débit de la ventilation
4.1 Débit d'air dans les cavités 4.1
4.2 Débit d'air à travers les orifices 4.4
4.3 Débit d'air à travers les chantepleures 4.5
4.4 Circulation de l'air dans le mur 4.6

5. Assèchement par ventilation
5.1 Humidité 5.1
5.1.1 Sources d'humidité 5.1
5.1.2 Accumulation d'humidité 5.2
5.1.3 Enlèvement de l'humidité 5.3
5.2 Le processus d'assèchement 5.4
5.2.1 Transport de la vapeur d'eau : diffusion 5.6
5.2.2 Transport de la vapeur d'eau : débit massique 5.7
5.3 Perméance à la vapeur équivalente 5.10
5.4 Évaluation de l'assèchement par ventilation 5.12
5.5 Contrôle de l'humidification attribuable à la ventilation 5.16

6. Conclusions et recommandations
6.1 Conclusions 6.1
6.2 Recommandations pour la construction 6.1
6.3 Recommandations pour d'autres recherches 6.2

7. Références 7.1

Annexe A : Évaluation de l'assèchement par ventilation : un exemple de conception A1

Annexe B : Résultat de certains tests relatifs à la pressions statique et dynamique dans les orifices de ventilation B1

Annexe C : Certaines statistiques sommaires sur la vitesse et la direction du vent, ainsi que les pressions de ventilation mesurées au Beghut C1

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

Figure	Titre	Page
1.1	Système de catégorisation des murs (selon le contrôle de la pénétration de la pluie)	1.3
1.2	Exemple de murs à orifices de ventilation	1.5
1.3	Mur européen à ventilation derrière le placage	1.7
1.4	Murs canadiens à modération de pression par opposition aux murs européens à ventilation derrière le placage	1.9
2.1	Géométries et dimensions typiques des orifices	2.2
2.2	Coefficients de débit pour des orifices standard de l'industrie	2.5
2.3	Photo d'un montage d'essai pour l'examen des caractéristiques d'un orifice à débit uniforme	2.6
2.4	Tests de pièces préfabriquées commerciales à encastrer dans des placages de maçonnerie	2.8
2.5	Comportement généralisé et observé d'un débit uniforme, à travers les orifices d'un bâtiment	2.10
2.6	Résultats des tests de pression statique (orifices des murs de maçonnerie)	2.13
2.7	Appareils de test de pression dynamique dans des orifices	2.16
2.8	Photo des appareils de tests de pression dynamique dans des orifices	2.17
2.9	Coefficients de débit dynamiques d'orifices, en fonction de la fréquence	2.22
3.1	Poussée thermique	3.2
3.2	Pression de ventilation par rapport à l'écart de température et à la hauteur de la cavité	3.3
3.3	Températures représentatives sur l'écran d'un mur à placage de brique	3.5
3.4	Vent, circulation d'air et gradients de pression sur un bâtiment	3.6
3.5	Pressions de ventilation causées par le vent	3.7
3.6	Gradients de pression moyens sur un bâtiment de faible hauteur	3.9
3.7	Gradients de pression moyens sur un bâtiment de moyenne hauteur	3.10
3.8	Gradients de pressions moyens sur un bâtiment de grande hauteur	3.11
3.9	Montage pour les relevés sur place des pressions de ventilation	3.13
3.10	Exemple de relevé sur la pression de ventilation, la pression de stagnation et la vitesse du vent	3.15
3.11a	Coefficients de ventilation moyens (moyenne, configurations nos 1 et 2)	3.16
3.11b	Coefficients de ventilation moyens (configurations nos 3, 4 et 5)	3.17
3.11c	Coefficients de ventilation moyens (toutes directions et configurations)	3.18
3.12	Potentiel de ventilation pour un mur d'essai	3.20
3.13	Exemple de relevé sur la pression de ventilation, la pression de stagnation et la vitesse du vent	3.22
3.14	Débit d'air en fonction de la vitesse du vent dans les rafales	3.25

4.1	Modèle de résistance d'une cavité à la circulation de l'air	4.1
4.2	Gammes de débit laminaire et turbulent dans des cavités murales	4.3
4.3	Débit de ventilation par rapport à la pression motrice dans certains murs typiques	4.7
5.1	Mécanismes d'accumulation de l'humidité dans une cavité (murs à écran pare-pluie)	5.1
5.2	Accumulation de l'humidité dans les cavités des murs à écran pare-pluie	5.2
5.3	Mécanismes d'enlèvement de l'humidité dans les cavités des murs à écran pare-pluie	5.3
5.4	Étapes de l'assèchement pour un matériau hygroscopique saturé	5.5
5.5	Modèle simple de chambre de mélange dans une cavité	5.8
5.6	Effet de la ventilation sur la condensation derrière un placage résistant à la vapeur	5.10
5.7	Potentiel d'assèchement par ventilation par rapport au débit de ventilation pour Waterloo (Ontario)	5.14
5.8	Procédure d'évaluation de la ventilation	5.15

Tableau	Titre	Page
2.1	Coefficients de débit dans des orifices à rebords aigus, déterminés à partir de tests à débit uniforme	2.11
2.2	Coefficients de débit des orifices déterminés à partir de tests sur des pièces préfabriquées à encastrer (placage de maçonnerie)	2.11
2.3	Série de tests sur la pression dynamique dans les orifices	2.15
2.4	Résultats des tests sur la pression dynamique dans les orifices	2.19
3.1	Pressions de ventilation calculées attribuables à la poussée thermique	3.2
3.2	Pressions de ventilation calculées attribuables à la poussée de l'humidité	3.28
5.1	Perméance à la vapeur équivalente pour divers débits de ventilation	5.12

1. Introduction

1.1 Contexte

L'orientation, les dimensions et la nature des orifices de ventilation aménagés dans les écrans pare-pluie sont importantes pour la performance des murs, car ces caractéristiques et propriétés agissent sur trois importantes fonctions des murs : le mouvement de l'air, la ventilation et la modération de la pression sur l'écran. Le mouvement de l'air et la ventilation dépendent tous deux du déplacement de l'air à travers la cavité située derrière l'écran. Par conséquent, les orifices peuvent influer largement sur la capacité d'un mur, à la fois de modérer les écarts de pression du vent sur tout l'écran, et d'aider à enlever la vapeur d'eau (voire la chaleur) de la cavité.

1.2 Objectifs

Le présent rapport a pour objet d'explorer l'influence des orifices sur la ventilation et la modération de la pression, en présentant les résultats de certaines expériences, en fournissant un résumé de la recherche connexe et en essayant d'établir un modèle théorique des phénomènes physiques en question. Le texte est consacré davantage aux orifices et à la ventilation plutôt qu'à la modération de la pression. La ventilation des murs à écrans pare-pluie a reçu très peu d'attention dans la recherche sur les immeubles canadiens. Notre rapport tente de définir les problèmes et le potentiel d'élaborer des limites supérieures et inférieures de performance vraisemblables et de fournir certaines théories et mesures pour préparer de futures études plus détaillées.

1.3 Envergure

Notre étude s'étend à tous les murs extérieurs dotés d'écrans pare-pluie et où l'air circule. Elle se limite cependant au mouvement de l'air à travers les orifices de l'écran et à l'influence de ce mouvement sur la performance du mur. Elle porte à la fois sur de orifices (de ventilation) idéaux et sur les pièces préfabriquées à encastrer, disponibles dans le commerce.

Les placages de maçonnerie sont spécialement intéressants à cause de leur usage répandu et de l'importance spéciale de la ventilation pour ce type de mur. Bien que les orifices servent aussi à drainer les murs (chantepleures), le drainage proprement dit n'est pas abordé dans la présente étude, même s'il faut souligner qu'il est un attribut absolument essentiel à tous les murs à écran pare-pluie.

Notre étude a été lancée grâce à une subvention dans le cadre du Programme de recherche extérieure de la SCHL. Les travaux réellement exécutés présentent deux grandes différences par rapport à notre proposition initiale :

(i) la performance de la circulation de l'air a entraîné beaucoup plus d'expériences que prévu;

(ii) en raison des améliorations apportées à la technologie de mesure des pressions, ainsi que de l'utilisation et du perfectionnement de nos propres installations, il a été inutile de recourir à des installations commerciales d'essai.

Par conséquent, nos travaux expérimentaux ont été beaucoup plus poussés que prévu. Pour ne pas allonger inutilement le texte, notre rapport ne présente pas les procédures ni l'équipement expérimental, pas plus que l'élaboration théorique et les calculs détaillés. S'il faut répondre à des questions techniques détaillées, le BEG fournira volontiers une documentation interne complète, les résultats des expériences ainsi que les calculs théoriques.

1.4 Approche

Le rapport commence par un exposé sur la circulation d'air à travers les orifices, sur la théorie de base applicable au phénomène et sur les recherches antérieures. Il décrit les expériences menées pour mesurer la performance des orifices, sous des pressions statiques et dynamiques, et traite des résultats.

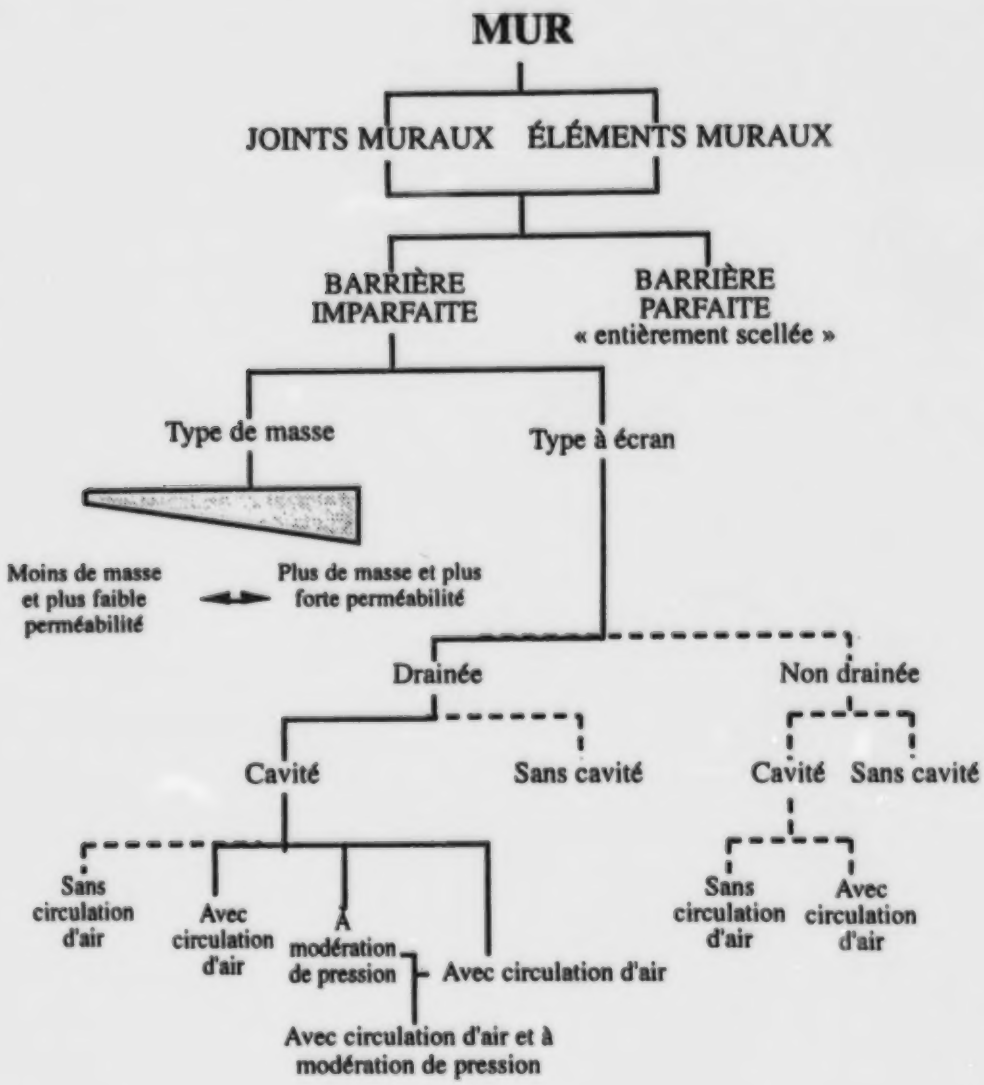
Il examine ensuite les forces qui font passer l'air à travers les orifices, décrit une série de mesures sur place, puis présente les résultats et conséquences de ces mesures sur les forces motrices d'un bâtiment de faible hauteur, et les compare à d'autres études sur place et dans une soufflerie.

Les deux prochains chapitres résument la mécanique du débit d'air à travers les cavités murales et les orifices, ainsi que le potentiel d'assèchement par ventilation. Les conclusions, les recommandations en matière de pratique et de recherche, ainsi que les références figurent à la fin du rapport. Les annexes donnent un exemple de calculs pour l'assèchement par ventilation et des échantillons des résultats expérimentaux.

1.5 Murs : définition et catégorisation

Pour aider à situer la présente étude dans son contexte et pour définir les termes qui seront employés pour tout ce rapport, tenez compte du système de catégorisation des murs présenté à la figure 1.1. Celui-ci se base sur la méthode par laquelle le mur contrôle vraiment la pénétration de la pluie, quels que soient les matériaux, la fonction du bâtiment ou l'intention de la conception.

Les murs sont formés des éléments et des joints qui les séparent, deux types de composants abordés de la même façon par le système de classification. En premier lieu, il s'agit de déterminer si un mur constitue une **barrière parfaite** (habituellement appelée « à surface étanche ») ou **imparfaite.** Étant donné qu'il est très difficile de construire et d'entretenir un mur constituant une barrière parfaite, la plupart des murs sont conçus en fonction d'une barrière imparfaite, à cause de leur masse ou de la présence d'un écran pare-pluie.



Notes :

Les murs sont classés selon le comportement réel, et pas nécessairement selon l'intention de leur conception.
Aux fins du présent système de classification, les définitions suivantes sont nécessaires :
Drainé : la plus grande partie de l'eau qui pénètre l'écran est enlevée par gravité.
Cavité : un espace libre ou plein facilitant le drainage par gravité et la circulation d'air, et résistant au transfert latéral de l'eau (coupure de capillarité).
À circulation d'air : permet, dans une certaine mesure, la diffusion de la vapeur d'eau et le mélange de l'air.
Ventilé : permet un écoulement important de l'air, surtout pour favoriser l'assèchement.
Modération de pression : une approche permettant de réduire les différences de pression d'air exercées sur l'écran.

Figure 1.1 : Système de catégorisation des murs (selon le contrôle de la pénétration de la pluie)

Les murs de construction massive contrôlent la pénétration de la pluie en absorbant et en accumulant l'eau de pluie qui pénètre à travers la surface extérieure. Cette humidité est ensuite enlevée par évaporation (assèchement) avant qu'elle n'atteigne la surface intérieure du mur.

Les murs à écran pare-pluie sont également des types de barrière imparfaite, car cette conception reconnaît qu'une certaine quantité d'eau de pluie pénétrera à travers l'écran (lequel résiste également au vent, à la neige, au rayonnement solaire, etc.). Des mécanismes supplémentaires, comme une coupure de capillarité, sont également utilisés pour empêcher l'eau de pénétrer plus loin vers l'intérieur. Le drainage est le mécanisme le plus courant et le plus important utilisé pour enlever l'eau de pénétration. Les lignes pointillées de la figure 1.1 montrent que, bien que peu souhaitables, des murs non drainés existent bel et bien.

L'aménagement d'une **cavité** derrière l'écran fournit une coupure de capillarité, un cheminement pour le drainage par gravité, ainsi qu'un cheminement pour l'écoulement de l'air. Une cavité est définie ici comme étant un espace dégagé sans obstruction, rempli ou non d'un matériau poreux, qui joue ces rôles.

Lorsqu'une cavité est présente derrière l'écran, il existe quatre principales classifications secondaires possibles selon le mouvement de l'air et les orifices :

Un mur à orifice permet, dans une certaine mesure, la diffusion de la vapeur d'eau et le mélange de l'air entre la cavité et l'extérieur. L'eau qui demeure dans la cavité, adhérant aux parois par tension superficielle ou absorbée par les matériaux formant les parois de la cavité, ne peut être retirée au moyen d'un drainage par gravité. La circulation de l'air (surtout la ventilation) fournit un autre mécanisme permettant d'enlever l'eau non drainée, ainsi que la vapeur d'eau ayant diffusé vers l'extérieur à partir des parois internes.

Un mur à modération de pression réduit la différence de pression exercée sur l'écran, grâce au choix judicieux de plusieurs caractéristiques (dimension, nombre et emplacement des orifices de ventilation) et à l'aménagement de la cavité sous forme de compartiments étanches et rigides. Pour exercer une importante modération de la pression, il suffit d'échanger un volume relativement faible d'air. Au Canada, un tel mur est habituellement appelé écran pare-pluie à équilibrage des pressions, mais il est peu probable que cet équilibrage se produise et l'écran ne protège pas seulement contre la pluie; c'est pourquoi les auteurs préfèrent l'expression « écran à modération de pression (EMP) ».

En augmentant le débit d'air dans et à travers la cavité, on peut en évacuer un volume de vapeur d'eau relativement élevé. Un mur ainsi **ventilé** contribuera à assécher à la fois la paroi interne et l'écran.

Un mur peut être à la fois **à modération de pression et ventilé**, ce qui est non seulement possible, mais aussi préférable.

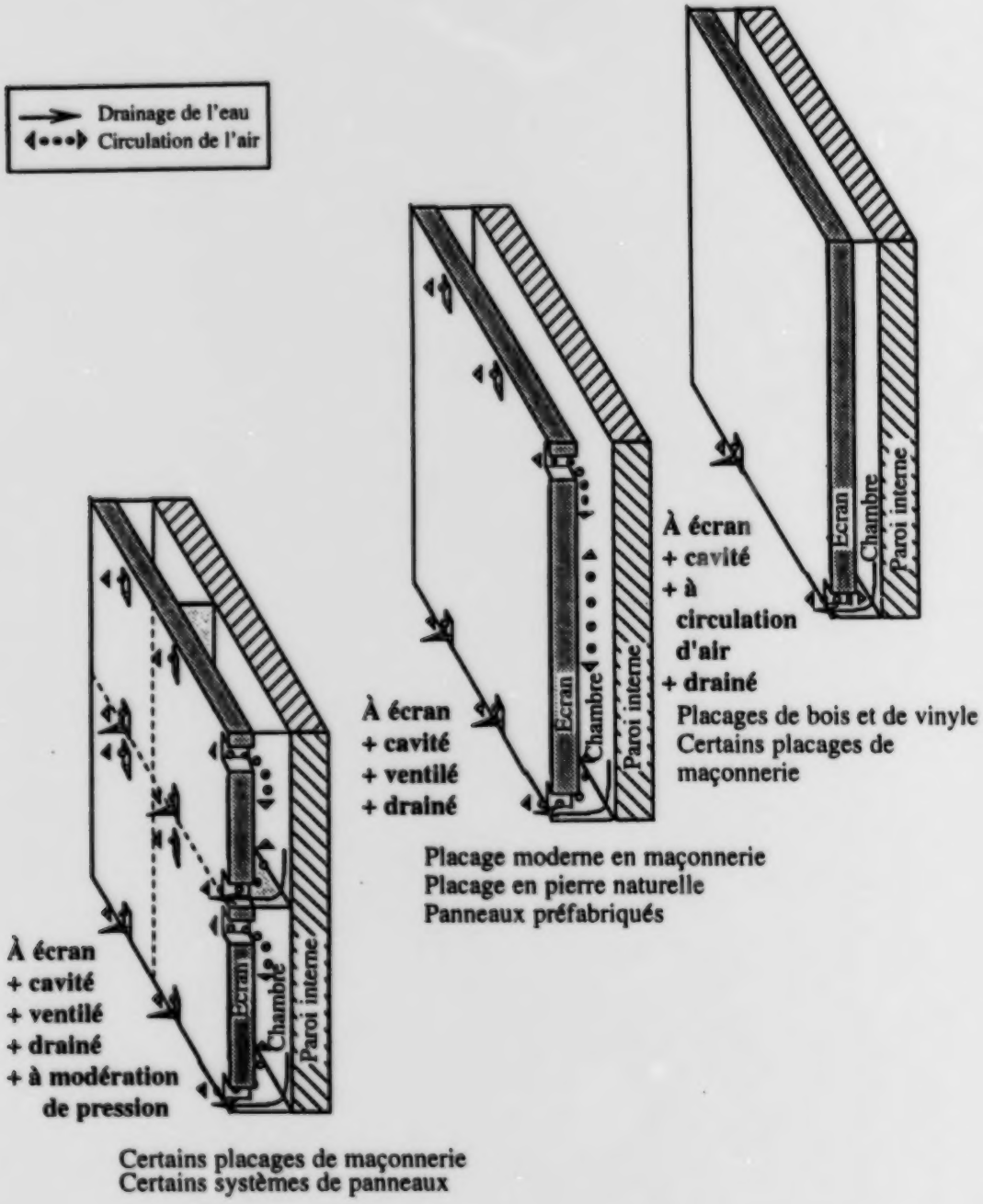


Figure 1.2 : Exemple de murs à orifices de ventilation

1.6 Murs à circulation d'air, ventilés et à modération de pression (examen)

La figure 1.2 présente des versions idéalisées et simplifiées de murs extérieurs comprenant des orifices de ventilation. Le mur commun à placage de brique, avec des barbacanes à circulation d'air, ainsi que des orifices de ventilation à la base de la cavité, est un exemple pratique. On comprend parfaitement que cette circulation d'air est à la fois nécessaire et bénéfique, car le placage de maçonnerie a une perméance à la vapeur d'environ 45 ng/Paxsxm^2 (de sorte qu'il constitue un pare-vapeur de type 2).

En aménageant des orifices de ventilation à la fois en haut et en bas d'un tel mur à placage de brique, on peut améliorer l'écoulement de l'air et le mur peut être considéré comme ventilé. En utilisant des joints ouverts à des intervalles de 600 mm, à la fois en haut et en bas de la cavité, on aménage une surface de ventilation de 0,05 à 0,1 % de la surface murale (de 2 à 4 % de la section transversale de la cavité), dans un mur typique d'une hauteur de 2,5 m. Toutefois, à ce que l'on sache, l'envergure et la nature de la circulation d'air dans un tel espace n'ont pas été étudiées en Amérique du Nord.

1.6.1 Modèles de murs européens

Depuis de nombreuses années, les concepteurs et les constructeurs de l'Europe continentale utilisent des murs ventilés, généralement drainés et à ventilation derrière le placage [1] (figure 1.3). Ceux-ci comportent de gros orifices de ventilation et de grandes cavités dégagées pour encourager celle-ci. La hauteur de la cavité (souvent de trois à six étages) et sa profondeur (de 30 à 50 mm couramment) facilitent la circulation de l'air, soit par l'effet cheminée, soit par la pression du vent, soit par les deux facteurs. Les surfaces des orifices prennent presque toujours la forme de fentes ou de joints ouverts sur toute leur largeur, de 12 à 25 mm de largeur, représentant de 20 à 100 % de la section transversale de la cavité. Souvent, on utilise la circulation d'air au parapet pour faciliter l'effet de fortes pressions de succion, exercées sur l'orifice supérieur, indépendamment de la direction du vent (tout comme une cheminée); cela permet de s'assurer que les effets du vent et la force ascensionnelle des gaz de cheminée poussent l'air dans la même direction. Naturellement, il faut prévoir un drainage et les cavités et les accessoires doivent être conçus de manière que très peu, s'il en est, d'eau atteigne la surface extérieure de la paroi interne. On a étudié en Europe les améliorations potentielles de la performance d'une telle ventilation.

1.6.2 Modèles de murs canadiens

Une stratégie de conception particulièrement répandue au Canada, même pour les placages de brique, consiste à tenter d'aménager un mur à écran pare-pluie et à équilibre des pressions (en réalité, on construit souvent un mur à écran modérateur de pression ou EMP). Deux caractéristiques des orifices de ventilation sont d'une importance critique pour la performance de ces murs : les dimensions des orifices individuels et la distance qui les sépare.

Si les orifices sont trop petits, ils peuvent limiter l'écoulement rapide de l'air dans les compartiments et à l'extérieur de ceux-ci. Par exemple, de fortes pressions causées par de courtes rafales peuvent être mal modérées. Naturellement, les orifices doivent être assez grands pour résister à la formation d'une obturation attribuable à la tension superficielle, tout en étant assez petits pour éviter la pénétration directe de la pluie poussée par le vent.

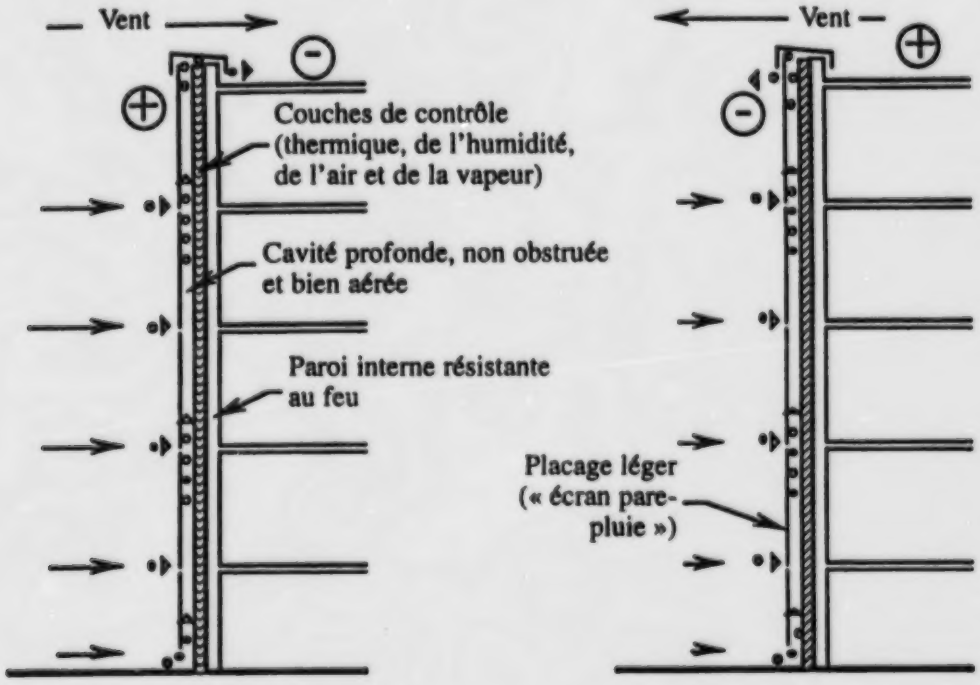


Figure 1.3 : Mur européen à ventilation derrière le placage

Si les orifices sont trop espacés, les variations de la pression spatiale dans le vent peuvent faire circuler l'air à travers la cavité, par temps de pluie; si ce débit est suffisamment rapide, l'eau de pluie peut être entraînée dans la cavité. Si, par contre, les orifices sont trop regroupés, les variations de pression spatiale qui se produisent à une certaine distance du groupe ne seront pas modérées, car il n'y a aucune possibilité de circulation d'air dans la cavité, c'est-à-dire que l'ensemble des orifices peut fonctionner à la manière d'un seul orifice de grande dimension.

Un récent examen des exigences relatives aux murs à modération de pression au Canada, effectué par Baskaran de l'IRC du CNR [2], suggère des surfaces d'orifices équivalentes à une proportion de 1 à 2 % de la surface murale. Cela se traduit par une proportion de 100 à 200 % de la section transversale de la cavité pour les murs typiques. Une grande surface est préférable pour les orifices, mais, en pratique, il est très difficile d'augmenter cette surface pour certains types de murs. La plupart des modèles de murs actuels à modération de pression fournissent une circulation d'air beaucoup plus faible (par exemple, elle est de 0,1 % pour un mur ordinaire à placage de brique).

L'usage d'une simple rangée horizontale d'orifices en bas de la chambre est aussi recommandé par Baskaran. En fait, il faut établir un équilibre entre un débit d'air acceptable à travers la cavité (un plus grand espacement menant à un plus gros débit) et une plus forte surcharge de pointe due au vent, contre la surface de l'écran (un plus grand espacement accroît la surcharge de pointe imposée par de petites rafales). Des années d'études locales et en soufflerie, ainsi qu'une analyse relativement directe de la turbulence spatiale causée par les pressions des vents, suggèrent que, plus les orifices sont nombreux et uniformément répartis sur un compartiment, plus le pourcentage de la surcharge due au vent exercée sur l'écran sera faible.

M^me^ Inculet [3], qui a effectué une étude théorique et en soufflerie des murs à écran modérateur de pression (EMP), suggère des dimensions ≥ à 2 % de la surface murale, tout en confirmant, de manière analytique, que plus les orifices sont nombreux et disposés uniformément à travers un compartiment, plus faible est le pourcentage de la surcharge attribuable au vent que devra subir l'écran. Son analyse montre qu'un mur doté d'une chantepleure en haut et en bas d'un compartiment carré (semblable aux murs européens à ventilation derrière le placage) réduira les surcharges de vent de pointe à 36 % (c'est-à-dire de 64 %) par rapport à un mur sans circulation d'air. Par contre, l'usage de deux orifices séparés et distincts au bas, avec la même surface totale de ventilation, n'entraînera qu'une réduction de 14 % (c'est-à-dire que 86 % de la surcharge du vent sera exercée sur l'écran).

1.6.3 Différences entre les modèles canadiens et européens

Il faut noter que la réalité est très différente de l'idéal simpliste d'un écran pare-pluie à équilibrage de pression; en effet, à cause des variations spatiales dans la pression du vent, si un tel mur a un seul orifice, la pression ne peut s'équilibrer. De multiples orifices distribués sur la surface du compartiment peuvent répartir la pression moyenne exercée sur la chambre, de manière que la plus faible différence moyenne de pression soit exercée sur l'écran. Les variations spatiales de pression entraîneront aussi un certain écoulement de l'air par les orifices, en raison des différentes pressions.

Il s'ensuit que la ventilation et la modération de pression peuvent coexister, mais les dimensions spatiales absolues des compartiments doivent être assez petites pour limiter les débits moyens à travers la cavité. La figure 1.4 présente sous forme graphique la différence de performance entre les modèles européen et canadien. Ce dessin présente une section (horizontale ou verticale) pratiquée à travers deux murs de dimensions similaires. Les murs européens, drainés et ventilés derrière le placage, sans séparateurs de compartiment et avec des grandes surfaces d'orifices, concentrent la restriction de la circulation de l'air dans la cavité, mais favorisent une circulation relativement facile entre les orifices. Par conséquent, comme le montre la figure 1.4, la chute de pression contre les orifices dans les murs européens est très faible et la diminution du débit par friction à travers la cavité, relativement importante. Par contre, les murs canadiens à écrans pare-pluie à équilibrage de pression (du moins pour la plupart des panneaux préfabriqués, des placages de pierre et de maçonnerie) fournissent des séparateurs de compartiments et de plus petits orifices, ce qui a pour effet de concentrer la résistance au débit dans les orifices et d'entraîner un écoulement relativement libre à travers la cavité. Par conséquent, la plus forte chute de pression se produit contre les orifices. Notez comment cette différence de résistance au débit influe sur la différence consécutive de pression exercée à la surface de l'écran : l'approche européenne entraîne une meilleure répartition moyenne de la différence de pression sur l'écran, car la résistance au débit d'air est, elle aussi, distribuée dans l'espace.

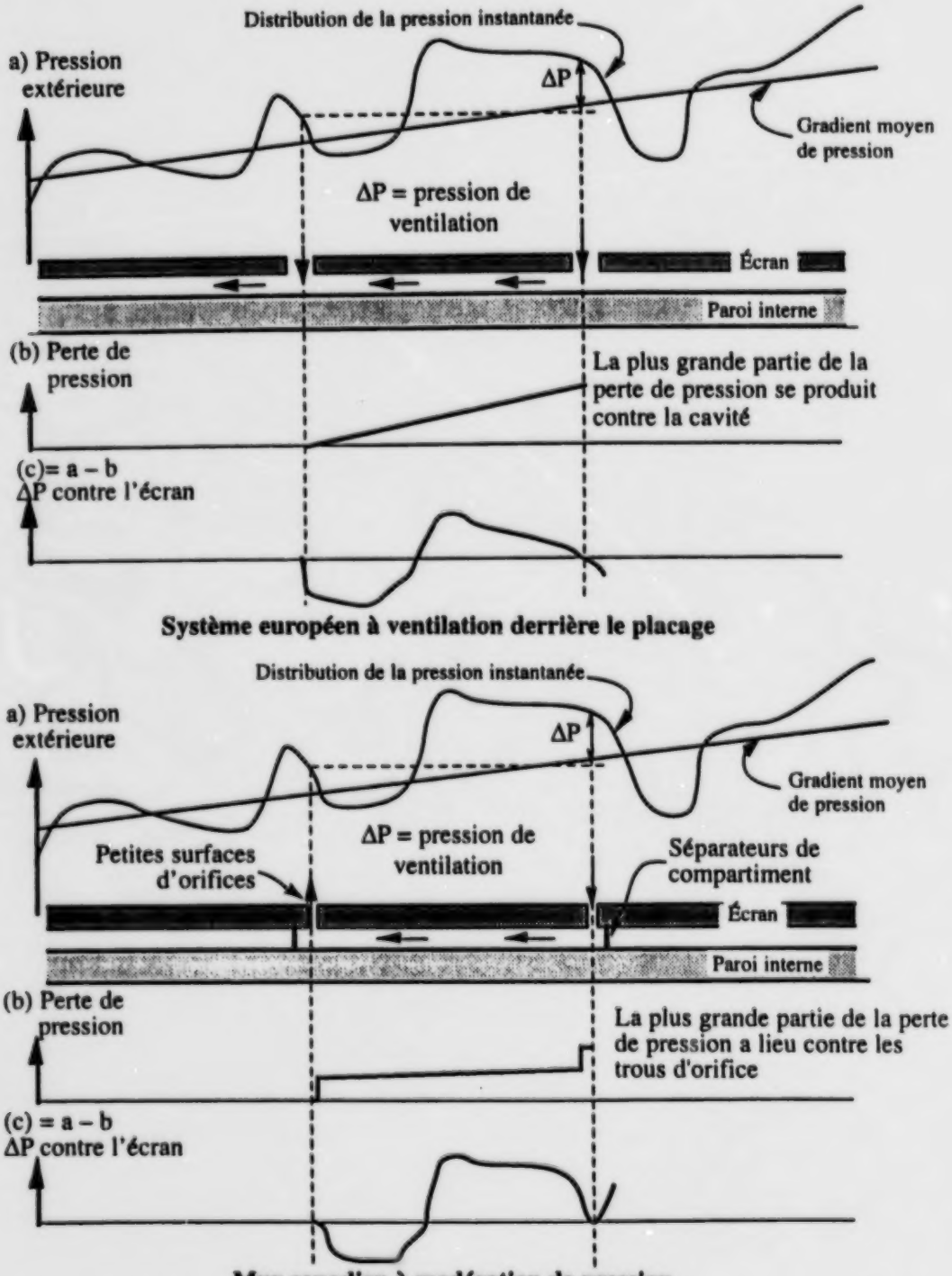


Figure 1.4 : Murs canadiens à modération de pression par opposition aux murs européens à ventilation derrière le placage

En effet, l'approche canadienne utilise des séparateurs physiques étanches à l'air pour compartimenter le mur, tandis que, pour exercer le même effet intrinsèque, les Européens utilisent la friction de la circulation d'air dans la cavité. Les joints doubles sont probablement compartimentés de manière très semblable.

Le bon choix des dimensions de cavités entraînera aussi de petits compartiments selon le mode européen. Récemment, une recherche publiée par Kramer et Gerhardt [4,5], basée sur des études sur place et en soufflerie, a commencé à reconnaître les avantages de la compartimentation au moyen de la friction; on suggère maintenant aux concepteurs d'utiliser de plus petites profondeurs de cavités (de l'ordre de 12 mm) pour accroître la friction, et de placer des séparateurs aux coins des bâtiments (là où les gradients sont si prononcés qu'à elle seule, la friction ne peut résister à la circulation de l'air).

L'avantage de l'approche européenne est que la ventilation (écoulement d'air de faible volume) est favorisée, tout en maintenant un degré utile de modération de pression. En vertu des faibles gradients de pression qui existent la plupart du temps, un important écoulement d'air se produit derrière l'écran et permet à l'humidité liquide emprisonnée de s'évaporer et de quitter le système mural sous forme de vapeur d'eau.

Un mur peut être conçu de manière à être à la fois ventilé et à EMP. L'assèchement par ventilation se produit de toute évidence seulement lorsque l'écoulement et les conditions internes et externes sont favorables, p. ex., lorsqu'il ne pleut pas et qu'il y a un peu de vent, c'est-à-dire, la plupart du temps. La modération de pression contribue à contrôler la pénétration de la pluie seulement lorsque celle-ci, sous l'impulsion du vent, frappe le côté exposé au vent, c'est-à-dire, rarement et jamais quand l'assèchement par ventilation pourrait se produire (bien qu'il puisse y avoir une ventilation proprement dite).

1.7 Codes et règlements

Bien que les codes et règlements du bâtiment puissent prescrire des valeurs minimales pour les débits de ventilation ou la surface de circulation d'air des toits et des vides sanitaires, les règles applicables aux murs sont rarement codifiées. Le *Code national du bâtiment du Canada* de 1990 (5.2.1.2.(1)) exige que, lorsqu'une couche extérieure à la couche ayant la plus forte résistance thermique résiste fortement à l'écoulement de la vapeur d'eau :

> *l'on aménage une lame d'air aérée de l'extérieur ou par une autre méthode aussi efficace, pour enlever la vapeur d'eau susceptible de passer du côté où la pression de vapeur est élevée jusqu'au matériau ayant la plus grande résistance thermique.*

Cette clause s'applique de toute évidence à la plupart des écrans (les placages de maçonnerie, de vinyle et de bois, ainsi que les tôles, ont tous une faible perméance à la vapeur) et un espace d'air ventilé est prévu dans la plupart des murs conçus avec ces placages.

La norme canadienne sur la maçonnerie des bâtiments (CAN3-A371-M84) exige (article 5.12.1) que des chantepleures aux dimensions minimales de 70 mm^2 soient pratiquées à des intervalles

de 600 mm, à la base de chaque mur en placage de maçonnerie. Cela équivaut à une surface d'orifice de 0,005 % de la surface murale pour un mur de 2,4 m de hauteur, et de 0,002 % pour un mur de 5 m de hauteur. Dans une note, la même clause ajoute, en substance :

> *une circulation d'air est souvent requise simultanément avec des chantepleures, pour que les murs à cavité et les placages fonctionnent convenablement.*

La nouvelle norme américaine sur la maçonnerie ACI 530-95/ASCE-95/TMS 402-95, Building Code Requirements for Masonry Structures, contient un nouveau chapitre sur les placages de maçonnerie. Les clauses 12.8.3, 12.9.4 et 12.10.2 exigent un espace d'air minimal d'un pouce (25,4 mm), pour assurer un drainage suffisant, et non la ventilation. Il n'y a aucune exigence minimale pour la circulation d'air. La clause 12.2.2 exige que les chantepleures aient des dimensions minimales de 3/16 po (5 mm) et soient espacées de moins de 35 pouces (825 mm) d'entraxe.

La Technical Note n° 27 du Brick Institute of America [6] donne des conseils largement respectés sur les placages en maçonnerie de brique à écran pare-pluie. Elle suggère d'aménager une cavité d'une profondeur minimale de 50 mm et des orifices en haut et en bas. Sans mentionner de surface de ventilation minimale absolue, la Note stipute que des joints verticaux ouverts à un maximum de 60 mm d'entraxe, placés en haut et en bas de la cavité, sont acceptables (une surface de ventilation inférieure à 0,1 %), tout comme des tubes de 10 mm de diamètre espacés de 400 mm d'entraxe (une surface de ventilation inférieure à 0,008 %).

D'autres codes du bâtiment (par exemple, la série de normes allemandes DIN) prescrivent plus précisément les mesures requises pour assurer une certaine ventilation. La norme sur la conception en maçonnerie, DIN 1053, clause 8.4.3.2 (maçonnerie à double parois internes avec lame d'air), exige un espace d'air ayant au moins 40 mm de profondeur et des orifices, en haut et en bas, avec une surface minimale de 7 500 mm^2 pour chaque surface de mur de 20 m^2, ce qui équivaut à environ 0,375 % de la surface murale. Le code applicable aux panneaux de revêtement de façade en pierre et en céramique, DIN 18 165, exige un espace d'air minimal de 20 mm, ainsi que des chantepleures horizontales en haut et en bas, de manière à former une surface de ventilation correspondant à une proportion de 1 à 3 % de la surface murale. Le code applicable aux placages de façade en général, DIN 18 516, exige un espace d'air d'au moins 20 mm et 5 000 mm^2 de surface de ventilation par mètre de longueur de mur, et des orifices d'au moins 20 mm.

La norme sur la protection contre l'humidité, DIN 4 108, prescrit des procédures, des matériaux et des valeurs climatiques à employer pour calculer la résistance d'un bâtiment à la condensation et aux rafales de pluie. Au moyen d'une simple analyse de diffusion Glaser à l'état stable, la DIN 4 108 exige que l'on calcule le volume de condensation pendant 1 440 heures de temps froid, ainsi que de l'évaporation subséquente durant 2 160 heures de temps d'été. La teneur en humidité des matériaux ne doit pas dépasser des valeurs données, et l'évaporation annuelle ne doit pas être supérieure à la condensation annuelle. La plupart des placages en pierre naturelle ne satisfont pas à ces exigences, car la résistance à la vapeur dans le placage est très élevée. En ventilant un espace d'air derrière le placage, le code permet d'exempter la structure de ces exigences. La norme DIN 4 108 indique des valeurs de perméance à la vapeur correspondant à deux catégories de briques : Klinker, avec une valeur de 20 à 40 ng/Pa•s•m^2, et Ziegel, avec une valeur de 200 à 400 ng/Pa•s•m^2. La catégorie

Klinker de briques au four ne doit pas être employée pour les placages de brique non conformes aux exigences de ventilation de la DIN 1 053, clause 8.4.3.2 (voir ci-dessus). La DIN 4 108 ne prévoit aucune inversion quotidienne de la vapeur en été, même si ce phénomène est généralement reconnu comme un important mécanisme d'humidification dans la documentation allemande.

En général, les codes européens sont beaucoup plus explicites et exigent clairement une surface de ventilation plus grande et des cavités plus profondes que les codes nord-américains. Les concepteurs et constructeurs nord-américains auraient sans aucun doute avantage à recueillir plus de renseignements sur le nombre et le type d'orifices applicables à leurs murs. Les valeurs prescrites par les codes pourraient être considérées comme un moyen en ce sens, mais seulement après que l'on aura quantifié les avantages et les inconvénients de la ventilation, et que le rendement sera prouvé sur place.

1.8 Recherches antérieures

Une recherche bibliographique a révélé que presque toutes les recherches sur la circulation d'air et l'assèchement par ventilation dans les bâtiments ont été menées en Europe. Bon nombre d'entres elles visent des panneaux muraux drainés et ventilés derrière le placage et ne tiennent pas compte de la ventilation des placages de brique.

Plusieurs études détaillées sur la mécanique de la ventilation ont été généralement utiles pour notre étude. Les textes allemands, *Belüftete Dach- und Wandkonstruktionen : Bauphysikalische Grundlagen des Wärme- und Feuchteschutzes* (ventilation de toit et constructions murales : notions fondamentales de la physique du bâtiment pour la protection contre la chaleur et l'humidité), par K.W. Liersch [7], et *Praktische Bauphysic*, par G. Lohmeyer [8], ainsi que le chapitre 2 du texte néerlandais *Bouwfysica 1 : Warme- en massatransport* (physique du bâtiment 1 : transport de la chaleur et de la masse) par Hugo Hens [9] renferment d'excellent renseignements de base sur la mécanique du débit de ventilation. Ces textes montrent également l'importance qu'accorde l'Europe continentale à la ventilation murale, dans la conception des panneaux standard de revêtement mural. Les méthodes de conception présentées dans ces textes insistent sur l'augmentation du débit de ventilation dans les placages à joints ouverts, mais donnent peu de conseils pour un concepteur souhaitant quantifier l'assèchement par ventilation ou utiliser un placage de brique.

Au Canada, **Guy et Stathopoulus** [10] ont analysé les conséquences de la ventilation à effet cheminée derrière un placage. Ils ont signalé qu'on pouvait réduire de 35 % la charge de refroidissement, par rapport à la valeur de calcul extrême, en utilisant une hauteur d'étage de 2,4 m, une cavité de 30 à 40 mm, ainsi qu'une surface de ventilation égale à 100 % de la section transversale de la cavité. En réduisant de moitié la surface de ventilation, on réduit les économies à 29 %; en outre, si l'on double simultanément la valeur d'isolation de la paroi interne, on abaisse encore le pourcentage à 20 %. En réduisant l'émissivité (de 0,9 à 0,4) et en diminuant la surface de ventilation à 25 % de celle de la cavité, on a réalisé des économies allant jusqu'à 50 %. L'analyse ne tenait pas compte de l'effet du vent. L'effet refroidisseur de la ventilation en hiver augmentera toutefois la consommation d'énergie pour le chauffage.

Le **Fraunhofer-Institut für Bauphysik** a examiné l'efficacité de la ventilation et de l'assèchement pour différents types de placages en panneaux. Un projet a permis de mesurer la vitesse de ventilation et le taux d'échange d'air derrière des placages en amiante, en ciment et en bois, avec divers types de cavités et dispositions des orifices. Après avoir installé le placage par-dessus une maçonnerie en béton initialement mouillée et aérée, on a contrôlé la teneur en humidité (et donc le taux d'assèchement) de ces blocs durant une période de deux ans. Un projet complémentaire comprenait la mesure sur place de la ventilation derrière de grands panneaux de placage sur un immeuble à trois étages. La recherche est consignée dans deux rapports confidentiels fournis au BEG par le directeur actuel de l'Institut [11,12], mais la plupart des conclusions se trouvent dans la référence [13]. Voici un résumé de certains résultats et conclusions importants :

- On a découvert que les caractéristiques murales les plus importantes étaient les dimensions des orifices et la présence d'une cavité non obstruée.
- Les trois principales forces influant sur l'assèchement par ventilation étaient les différences de pression attribuables au vent, la poussée solaire (effet cheminée) et le chauffage solaire, lequel augmentait la température de l'air situé dans la cavité et permettait ainsi le déplacement d'un volume beaucoup plus gros de vapeur d'eau.
- On a mesuré des vitesses horaires moyennes de l'air de 0,05 à 0,15 m/s dans les cavités murales, lorsque la vitesse du vent était entre 1 et 3 m/s. La direction du vent, plus que sa vitesse, a influé sur la vitesse de l'air de ventilation.
- Les murs dotés de joints non étanches (p. ex., ardoise, bardeaux) étaient également ventilés (selon les techniques au gaz de dépistage), mais dans une moindre mesure que les murs où la circulation d'air était intentionnelle. Plus les joints étaient nombreux et propices aux fuites, plus la cavité était ventilée. On a présumé que le mécanisme de ventilation de ces murs était le pompage exercé par le vent.
- Une ventilation suffisante permettait rarement la formation de condensation à l'arrière du placage.
- Les chercheurs ont tiré les conclusions suivantes : une profondeur de cavité non obstruée (compte tenu des tolérances et du blocage potentiel) de 20 mm suffit généralement pour les placages à panneaux; bien qu'une grande surface de ventilation ne soit pas absolument nécessaire pour un rendement acceptable du mur, c'est un moyen pratique d'enlever l'humidité emprisonnée; la ventilation est moins importante si la contre-cloison ou le placage a une faible perméance à la vapeur, ou si le placage laisse passer un débit d'air suffisant.
- Il était recommandé de toujours prévoir une ouverture en bas du placage, pour permettre le drainage du condensat formé à l'arrière; si l'on utilise des matériaux sensibles à l'humidité pour fabriquer la contre-cloison, il est important de veiller à empêcher la capillarité; en outre, les ouvertures des orifices supérieur et inférieur doivent être les plus grandes possibles, surtout pour les contre-cloisons présentant une forte accumulation d'humidité.

Le **Norwegian Building Research Institute** a mesuré le gradient de pression dans un espace d'air situé derrière un placage vertical en bois, sur une installation d'essai rotative, à Trondheim, en Norvège [14]. L'objectif du projet consistait à évaluer l'effet refroidisseur du courant d'air traversant l'isolant fibreux adjacent à la cavité. Les chercheurs ont découvert qu'un pare-vent (et non un pare-air) est indispensable pour réduire la perte thermique par convection, à travers une isolation fibreuse de faible densité. En outre, le gradient moyen de pression derrière le placage était en étroite corrélation avec la vitesse et la direction du vent. L'influence du chauffage solaire n'a pas été examinée. On a mesuré des gradients maximaux de pression dans la cavité de presque 100 Pa/m pendant des orages avec vents violents (environ 30 m/s). Les gradients moyens de pression pour toutes les directions du vent, en fonction d'une vitesse moyenne de 3 m/s, se situaient entre 0,1 et 0,5 Pa/m.

Schwarz [15] a examiné aux instruments un immeuble d'appartements de 18 étages situé à Hambourg, en Allemagne, et doté d'un placage à panneaux à joints ouverts de 1,25 m sur 1,35 m, pour mesurer la vitesse du débit d'air dans la cavité. Les recherches effectuées par l'Institute für Bauphysik ont mesuré des vitesses de 0,2 à 0,6 m/s en fonction d'une gamme de vitesses du vent de 0 à 5 m/s. Les chercheurs n'ont trouvé que peu de relation entre la hauteur de l'immeuble et la vitesse de ventilation de la cavité. En outre, même si les vitesses dans la cavité mesurées pour le côté sous le vent étaient inférieures à celles du côté exposé au vent, la vitesse du côté sous le vent était généralement stable, autour de 0,2 m/s pour la gamme normale de vitesses du vent. Le taux d'échange d'air était donc de plusieurs centaines d'échanges à l'heure, et la diffusivité de la vapeur jouait un rôle nettement insignifiant dans le transfert de la vapeur de l'intérieur vers l'extérieur.

Akoestisch Advies Bureau Peutz & Associes BV [16], un groupe de consultation néerlandais, a mené une étude à la fois théorique et en soufflerie du potentiel de ventilation dans un produit de placage à joints ouverts et à petits panneaux. Ces analyses et mesures suggèrent que des produits de placage convenablement conçus pourraient en moyenne être soumis à des vitesses de ventilation de 0,5 à 3 m/s. Pour les conditions prédominant aux Pays-Bas, de telles vitesses provoqueraient une ventilation suffisante pour empêcher la condensation à l'arrière des panneaux, dans des murs typiques à contre-cloisons. Les panneaux examinés avaient de 200 à 800 mm de hauteur, étaient installés sur une cavité de 20 mm et avaient des joints ouverts sur toute la largeur de 20 mm.

VENTILATION DERRIÈRE LES PLACAGES DE MAÇONNERIE

Les rapports sur les études d'assèchement par ventilation dans des placages de maçonnerie sont plus difficiles à trouver, et les résultats tendent à être beaucoup moins concluants.

Kenneth Sandin [17], de l'université Lund, en Suède, a mené ce qui est peut-être l'étude la plus détaillée de la ventilation derrière des placages de brique. Le travail consistait en une étude sur place de grande envergure portant sur différents types de murs à placage de briques et armature de bois, pour le ByggforskningsrDdet (conseil de recherches sur le bâtiment) suédois. Dans ses mesures des taux d'échange d'air dans une cavité, il a découvert que les joints verticaux ouverts,

placés à des intervalles typiques, augmentaient bel et bien les taux d'échange, en comparaison avec les taux obtenus par des tubes de drainage. Dans des conditions météorologiques typiques, on a mesuré des taux d'échange d'air de 0,3 à 8 changements à l'heure. Toutefois, c'est seulement après l'enlèvement d'une brique entière tous les 1 200 mm que l'on a pu constater des taux importants de ventilation de 3 à 25 changements à l'heure. Même si l'on croyait que le vent était le principal mécanisme de ventilation, les taux de ventilation observés pendant des périodes où le placage était plus chaud que l'air extérieur étaient presque toujours supérieurs à ceux observés lorsque le placage était à la même température que l'air extérieur. Dans d'autres ouvrages publiés [18,19], M. Sandin s'interrogeait sur l'efficacité de la ventilation dans un climat (semblable à celui du Canada) où l'assèchement par ventilation pourrait enlever 3 kg d'humidité par mois et les rafales de pluie, en déposer de 20 à 50 kg par mois.

Le **Fraunhofer-Institut für Bauphysik** a également mené des études sur place de la teneur en humidité des placages de brique dans des murs avec et sans (la cavité était remplie d'isolant) espace d'air [20]. Durant environ deux ans, on a effectué une centaine de mesures gravimétriques sur plusieurs murs construits conformément à la DIN 1 053. Les auteurs ont conclu que la présence d'une lame d'air n'avait aucun effet sur la teneur en humidité du placage de brique.

L'**Institut für Ziegelforschung** (institut de recherche sur la brique) d'Allemagne a mené une étude sur place exceptionnelle consacrée à l'effet de la ventilation sur le séchage des briques [21]. On a construit un bâtiment d'essai (à Essen, en Allemagne), présentant une cavité de 40 mm de profondeur et aérée, dans sa partie supérieure, par un joint ouvert de 30 mm sous les avant-toits et par des joints ouverts en bas (tous les 250 mm). La vitesse moyenne de ventilation mesurée était d'environ 0,1 m/s pour une vitesse moyenne du vent de 2,6 m/s. Cette vitesse de ventilation était considérée comme assez faible pour ne pas influer sensiblement sur la valeur d'isolation de l'espace d'air, tout en provoquant néanmoins une moyenne de 100 échanges d'air à l'heure. Les mesures portant sur la teneur en humidité des briques, immédiatement après la construction, ont montré que l'assèchement était plus rapide du côté de la cavité qu'à l'extérieur. En trois semaines, la teneur en humidité par volume des briques a baissé de 12 % à environ 1,5 %. Au cours d'un récent exposé, l'ingénieur de recherche a indiqué que le principal obstacle à un important assèchement par ventilation, dans les murs à placage de brique, était la présence d'obstructions de mortier dans la cavité. À son avis, la spécification d'une cavité de 50 mm et de grandes surfaces de ventilation permettrait d'obtenir des résultats pratiques semblables à ceux obtenus pendant l'étude plus contrôlée.

Le **Laboratorium voor Bouwfysica**, en Belgique, a mené une série d'études sur place, en laboratoire et théoriques sur les murs à cavité de maçonnerie. Un rapport sommaire [22] traite du problème de la ventilation derrière les parements de brique. On a montré que la ventilation n'avait pratiquement aucun effet sur les valeurs de transmission de la chaleur dans l'espace d'air, mais il s'est également révélé difficile de quantifier l'avantage de la ventilation pour les taux de déshumidification. Bien qu'il soit recommandé de continuer d'utiliser la ventilation dans les murs à placage avec lame d'air, l'auteur déclare qu'il faut seulement des ouvertures de drain dans des cavités remplies d'isolant, car les taux de ventilation seraient très faibles de toute façon. C'est également l'approche adoptée par le code allemand DIN 1053.

Il subsiste une grave pénurie de renseignements quantitatifs concernant l'effet de la ventilation sur le rendement des murs. La tendance actuelle en Allemagne semble s'éloigner de la ventilation et se rapprocher de placages et peintures diffuseurs de vapeur. Peu de recherches ont été menées sur les systèmes à panneaux ventilés, car les chercheurs et les constructeurs croient que l'application des codes actuels donnera un rendement satisfaisant. On comprend mal l'influence de la ventilation sur les murs à placage de brique, et il faudra beaucoup d'autres recherches avant de tirer des conclusions quelconques.

2. Orifices et circulation d'air dans les orifices de ventilation

2.1 Types d'orifices

Les orifices utilisés pour les murs à écran pare-pluie peuvent se diviser en trois principaux types (figure 2.1) :

- **Petites ouvertures circulaires et chantepleures arrondies.** Certains types de placage à contact (vinyle), cadres de fenêtres et murs rideaux utilisent souvent des ouvertures circulaires ou ovales de 3 à 6 mm de hauteur et de 3 à 25 mm de largeur. Ces orifices sont habituellement formés d'un matériau mince (épaisseur de 0,5 à 3 mm) comme l'aluminium, les PVC, etc.

  On a étudié en détail la circulation de l'air à travers des orifices circulaires à rebords aigus. Théoriquement, ce type d'orifice est aussi le plus facile à analyser et a donc été considéré comme donnée relative au comportement pour cet ouvrage. De plus, on analyse souvent des orifices non circulaires à écoulement, en examinant un orifice circulaire de diamètre équivalent. Par conséquent, nous avons choisi d'étudier une gamme d'orifices ayant à la fois des rebords aigus et droits, et nous avons tenté de comparer les résultats à la théorie actuelle et à d'autres recherches publiées. L'étude a porté sur plusieurs tailles d'orifices (de 1 mm Ø à > que 22 mm Ø) dans une plaque de 3 mm d'épaisseur. Pour tester la pertinence de la théorie des orifices circulaires de diamètre équivalent aux orifices de brique, on a examiné un tuyau de 19 mm Ø sur 90 mm de longueur, en comparant les résultats aux orifices dans la plaque mince.

- **Ouvertures rectangulaires profondes.** Ces ouvertures sont surtout utilisées pour les placages de maçonnerie. À ce titre, leurs dimensions standard sont de 10 mm de largeur sur 60 à 80 mm de hauteur d'élévation, et sur 85 à 90 mm de profondeur.

  Étant donné que les placages en maçonnerie sont très courants, surtout dans les immeubles résidentiels, l'expérimentation a surtout porté sur le comportement des joints ouverts relativement standard. Le rapport hauteur-largeur (10/65) et largeur-profondeur (10/90) prévoit un orifice de brique à joints verticaux ouverts dans un secteur relativement inexploré de l'écoulement d'air dans des orifices. On ne peut pas présumer que les orifices de brique se comporteront comme une simple chantepleure infiniment large (c'est-à-dire, en ignorant les effets des deux bords courts). Ils sont trop profonds pour se comporter comme un orifice à bords réguliers et trop peu profonds pour faire office de tuyau. En pratique, on utilise souvent des pièces préfabriquées à encastrer pour résister à la pénétration directe de la pluie et pour empêcher celle des insectes; on a pensé que ces orifices pourraient influer sur les caractéristiques d'écoulement de l'air. Par conséquent, on a également évalué le rendement de quatre types de pièces préfabriquées à encastrer, disponibles dans le commerce.

- **Grandes chantepleures.** Pour une raison quelconque, les joints ouverts dans les placages en pierre naturelle, les panneaux préfabriqués et d'autres placages en panneaux, sont répandus. De nombreux systèmes drainés et à ventilation derrière le placage, en Europe, utilisent une série d'ouvertures horizontales pratiquées aux joints des panneaux. Selon la nature de l'écran, la largeur approximative des ouvertures oscille entre 5 et 20 mm, et la profondeur (épaisseur de l'écran), entre 10 et 100 mm.

  On emploie quelquefois des chantepleures semi-continues (c'est-à-dire, que la longueur est de plusieurs fois supérieure à la hauteur ou à la largeur) pour les cavités de ventilation dans l'enveloppe d'un bâtiment. De telles chantepleures, en raison de la grande surface de ventilation, offrent une résistance comparativement faible à l'écoulement de l'air. Le rapport largeur-hauteur d'un orifice de brique (environ 1/7) représente un extrême du comportement prévu d'une chantepleure profonde. Un rapport plus élevé (1/15) et une chantepleure moins profonde (c'est-à-dire, un placage plus mince) offriront moins de résistance au passage de l'air ; de telles chantepleures peuvent faire l'objet d'un modèle réaliste de longueur infinie et aux orifices réguliers.

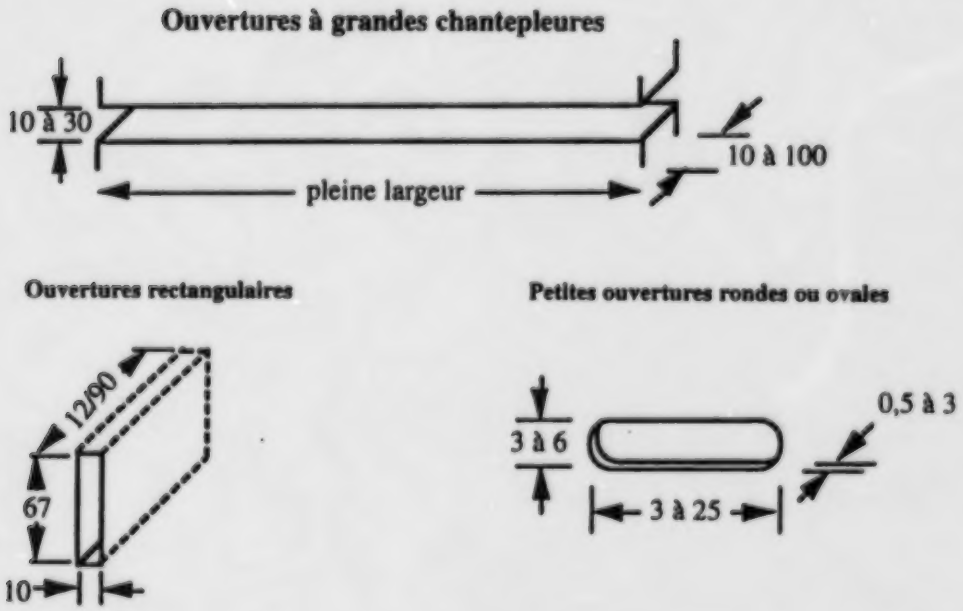


Figure 2.1 : Géométries et dimensions typiques des orifices

2.2 Circulation d'air dans les orifices de ventilation : théorie de base

Le débit volumétrique fluide traversant un orifice à bords aigus, en fonction d'une différence de pression, est habituellement décrit par la relation fondamentale suivante [23] :

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}},$$

où Q est le débit volumétrique fluide,
A est la surface de l'orifice,
ρ est la densité du fluide,
ΔP est la différence de pression, et
C_d est un facteur représentant les pertes par friction et turbulence.

Cette relation peut être tirée de l'équation du courant de base de Bernoulli. La valeur de C_d (appelée coefficient de débit) doit s'appliquer à des mesures réelles et ne peut être calculée par analyse que dans certaines situations exceptionnelles. Le coefficient de débit comprend deux parties : le coefficient de contraction, C_c, et le coefficient de vitesse, C_v. Le premier tient compte du fait que le flux se rétrécit en passant à travers l'orifice; le second tient compte des pertes attribuables à la friction et à la turbulence.

Pour le débit turbulent (à haute vitesse) à travers un orifice circulaire à bords aigus, Kirchoff a calculé un coefficient de débit de $\pi/(\pi + 2) = 0{,}611$; on utilise couramment cette donnée dans une grande partie de la documentation sur la science du bâtiment.

L'écoulement à travers des orifices, fentes ou chantepleures de grande profondeur se décrit mieux par l'équation plus générale de la loi de la puissance :

$$Q = C_d \cdot A \cdot \left(\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}\right)^n,$$

où toutes les variables sont les mêmes que précédemment, mais la racine carrée est remplacée par l'exposant de débit, n.

Pour les orifices aux bords aigus et les gros orifices, ainsi qu'un écoulement turbulent, l'équation se simplifie jusqu'à la même équation que précédemment (c'est-à-dire, $n = 0{,}5$). Pour un écoulement laminaire, le choix d'une valeur plus élevée de n (mais toujours inférieure à 1,0) convient davantage aux données et est théoriquement plus acceptable. Un exposant de débit de 0,5 montre que l'écoulement est entièrement turbulent. Un exposant de 1,0 dénote un écoulement entièrement laminaire.

Bien que la formule de la loi de la puissance soit largement utilisée pour relier la chute de pression et le débit à travers les ensembles et composants de l'enveloppe du bâtiment, il faut noter que de plus en plus de recherches remettent en question la validité de cette loi [24 - 28], surtout à de

faibles débits et pour de petites ouvertures. ASHRAE [29] suggère que l'on peut employer la loi de puissance pour décrire le débit à travers des orifices normaux, correspondant à des valeurs du nombre de Reynolds aussi faibles que 250 (comme nous l'indiquons plus loin dans le présent rapport, le nombre de Reynolds est un nombre non dimensionnel reliant des forces inertielles aux forces de viscosité dans l'écoulement fluide). Néanmoins, jusqu'à ce que des résultats expérimentaux plus irréfutables prouvent le contraire, la loi de la puissance est vraisemblablement appropriée et probablement assez précise pour les ouvertures d'orifices qui nous intéressent et pour les débits qui se produisent dans les orifices muraux.

Les orifices soigneusement calibrés pour être utilisés comme des normes internationales (ISO) ou industrielles (ASTM) ont généralement des coefficients de débit plus élevés que ceux calculés par Kirchoff et, ce qui est plus important, les coefficients varient avec la vitesse du débit (plus précisément, avec le nombre de Reynolds). Ces normes ont également tendance à limiter les dimensions minimales des orifices à 12 mm. La figure 2,2 présente les valeurs C_d (égales à $C_c \cdot C_v$) pour un tel orifice standard et une buse standard. À des débits très élevés, le coefficient de débit peut vraiment converger vers une valeur de 0,61, mais les enveloppes de bâtiments s'approchent rarement d'un tel niveau. Les normes définissent de façon rigide l'emplacement où l'on mesure la pression, pour assurer des résultats répétés. Toutefois, le choix des dimensions et de l'emplacement de la prise de pression se base sur l'application pratique et non sur des considérations théoriques; par conséquent, les coefficients mesurés de débit sont rarement conformes aux valeurs théoriques dérivées [30].

2.3 Tests de pression statique dans les orifices

La mesure des caractéristiques de débit des divers types d'orifices, selon une gamme de débits uniforme, a servi de point de départ au programme expérimental. Il faut toutefois noter que le débit de ventilation est susceptible d'être très lent et quelque peu variable, et les débits de modération de pression sont susceptibles d'être très variables autour d'une moyenne souvent proche de zéro. On a tenté d'assortir, à des conditions plus réalistes, les résultats obtenus pour un débit régulier, afin que les recherches actuelles puissent servir à valider et à étendre nos résultats.

2.3.1 Objectif

L'objectif des expériences relatives à un débit d'orifice statique était de caractériser un orifice en termes de coefficient de débit, C_d, et d'exposant de débit, n. Ces valeurs peuvent alors être comparées à d'autres recherches tout en donnant une description complète du volume de débit d'air auquel on peut s'attendre lorsqu'un orifice est soumis à une différence donnée de pression d'air.

2.3.2 Appareils

Les appareils élaborés pour mener les expériences sur le débit à l'état stable consistaient (figure 2.3) en un ventilateur pour produire le débit, en des soupapes pour régulariser celui-ci, ainsi qu'en un tube de plexiglas de 1,2 m de longueur et de 250 mm de diamètre, auquel un des orifices pouvait être attaché. Les instruments comprenaient un groupe de débitmètres en parallèle pouvant

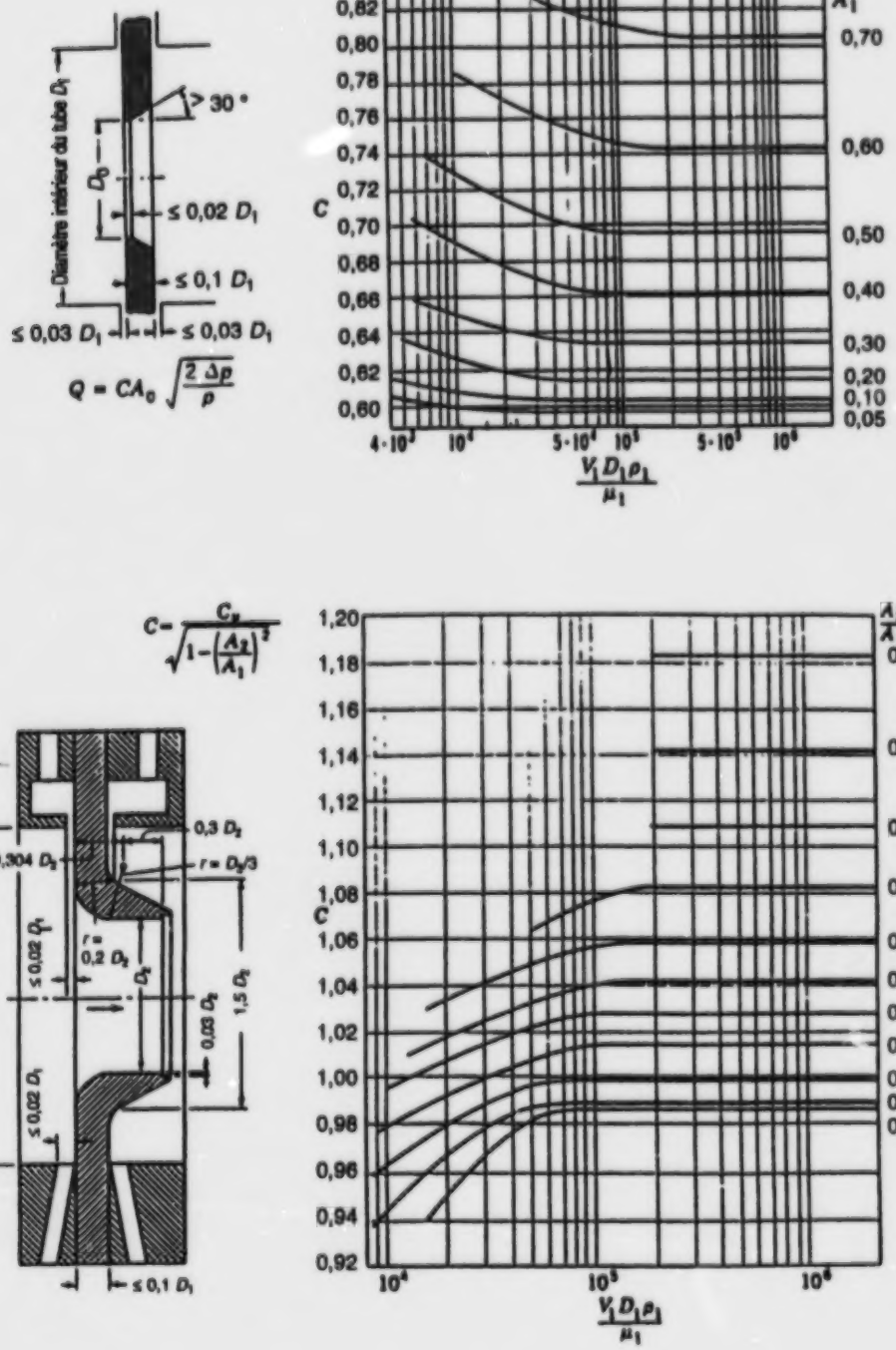


Figure 2.2 : Coefficients de débit pour des orifices standard de l'industrie [23]

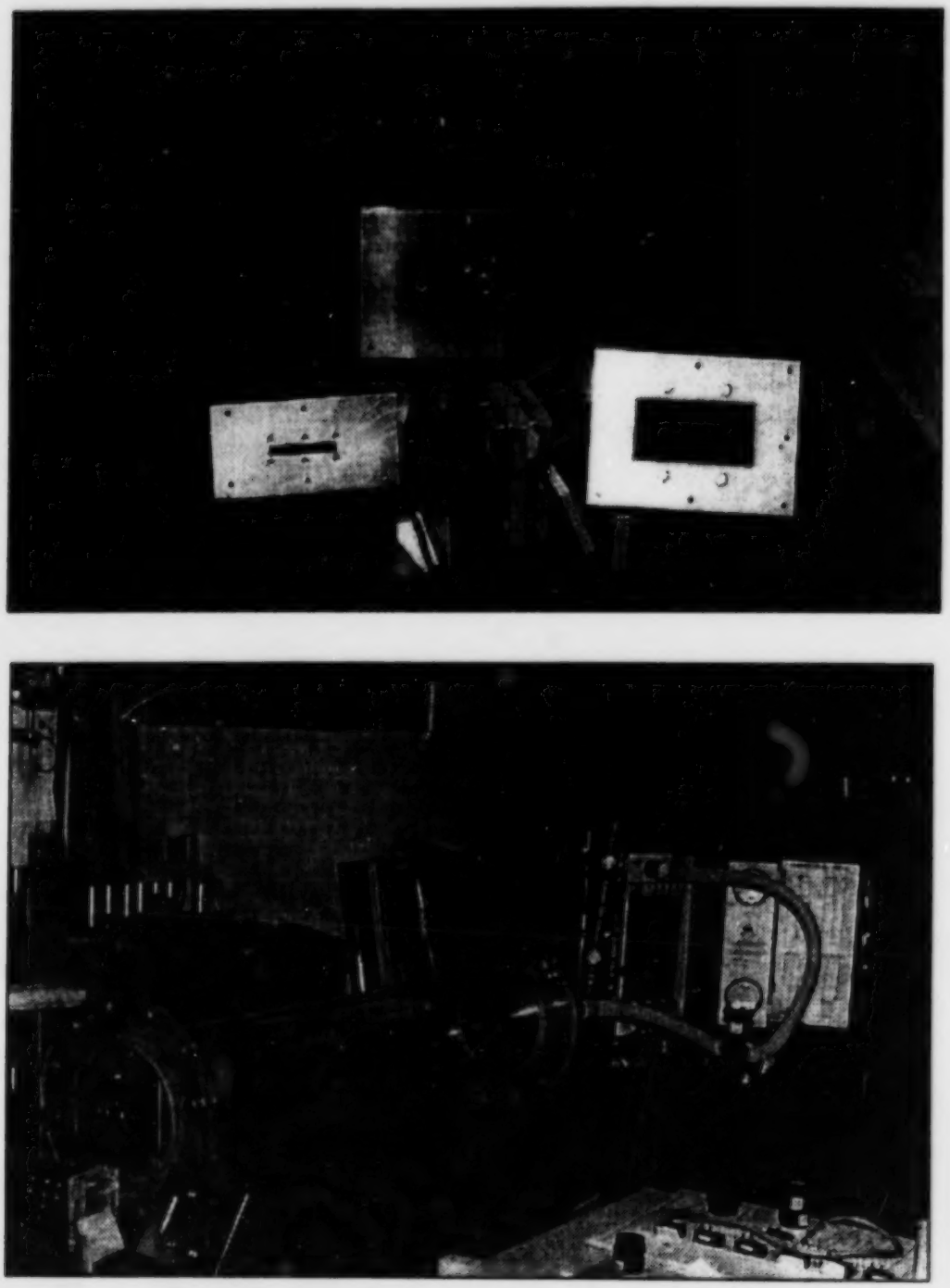


Figure 2.3 : Photo d'un montage d'essai pour l'examen des caractéristiques d'un orifice à débit uniforme

mesurer les débits (de 0,02 l/min à 200 l/min), ainsi que des transducteurs de pression ou manomètres pour mesurer exactement la chute de pression (de 0,1 Pa à 3 000 Pa).

Le tube de plexiglas avait plusieurs usages. Sa longueur permettait de stabiliser le débit du ventilateur avant que l'air n'atteigne la section du test d'orifice. Son diamètre était choisi afin que l'orifice soit exposé à un débit très similaire à celui d'un orifice mural dans des conditions réelles (c'est-à-dire que le diamètre du tube était beaucoup plus gros que celui de l'orifice). Le volume du tube était établi de manière que ce dernier fonctionne comme réservoir et atténue les petites variations de débit à court terme. Le tube transparent a aussi permis d'examiner la nature du débit, c'est-à-dire que l'on pouvait ajouter de la fumée au débit d'air et observer clairement la nature de celui-ci.

Les pièces préfabriquées commerciales à encastrer, ayant fait l'objet de tests, sont illustrées à la figure 2.4.

2.3.3 Procédure

Avant de commencer chaque série de tests à l'état stable, on a installé la section de test d'orifice et scellé étroitement l'ouverture de l'orifice. On a ensuite pu déceler les fuites dans le système de test (circulation d'air à travers les connexions, les joints, etc.), en appliquant plusieurs fortes pressions et en mesurant le débit. Étant donné que le système était exceptionnellement étanche, il a souvent fallu des pressions supérieures à 500 Pa pour produire des fuites mesurables.

On a descellé l'orifice, puis enregistré le débit et la pression connexe à des intervalles de 15 à 30 points, en étapes approximativement égales d'augmentation de pression, puis de diminution de celle-ci. En général, au moins trois passages semblables ont été effectués. La température de l'air était relativement constante pendant tous les tests.

Le coefficient de débit et l'exposant de débit ont été calculés à partir des données enregistrées, au moyen d'une analyse de régression des moindres carrés.

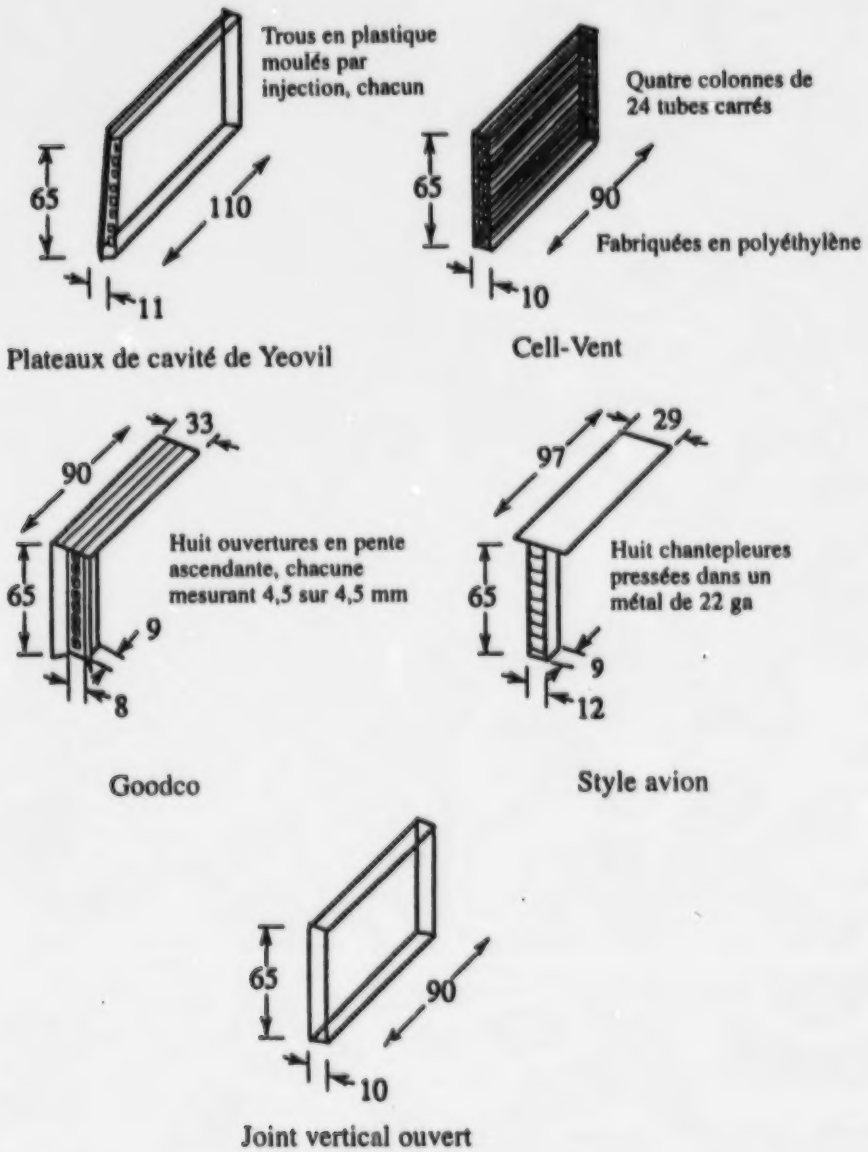


Figure 2.4 : Tests de pièces préfabriquées commerciales à encastrer dans des placages de maçonnerie

2.3.4 Résultats

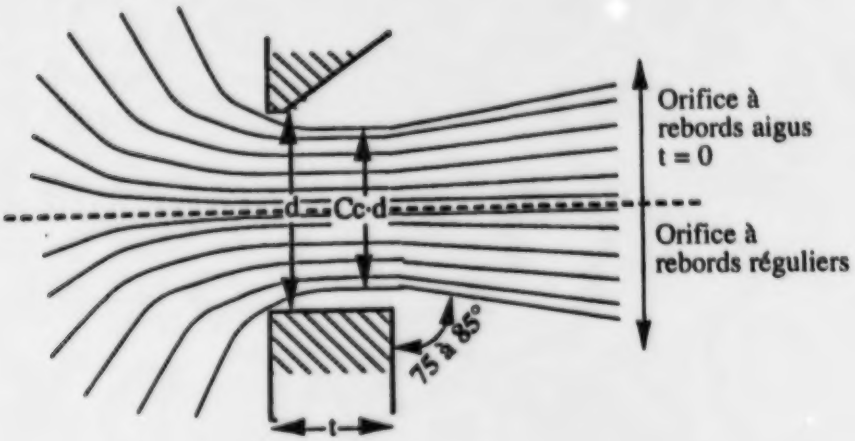
L'analyse documentaire et les expériences de visualisation de débit que nous avons menées ont permis de comprendre les aspects de comportement du débit des orifices. La figure 2.5 et l'exposé ci-après résument ce comportement.

L'écoulement à travers des orifices à rebords aigus (rapport épaisseur-diamètre = t/d < 0,5) était semblable à la théorie : l'air était attiré de toutes les directions du côté à haute pression, et le débit se contractait juste après le rebord en amont de l'entrée. Le flux de sortie était un cône pointu relativement défini avec un angle de 10 à 15 degrés par rapport à l'axe central, même à des débits très faibles. Ce comportement n'a pas changé pendant la gamme de pressions testées (de 1 à 500 Pa). Le coefficient de contraction, C_c, est indiqué à la figure 2.4a.

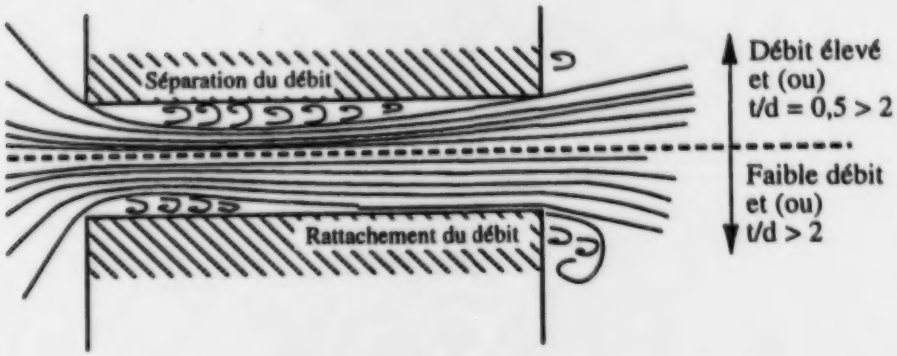
Le débit à travers les orifices plus profonds (rapport t/d plus grand), comme le joint vertical ouvert en brique et le tube de 90 mm de profondeur, s'est comporté tel qu'indiqué à la figure 2.4b et c. Pour de faibles débits ou des orifices peu profonds, l'écoulement prenait de l'expansion après l'entrée et, malgré un début de contact avec le rebord de la sortie, il demeurait un flux séparé ou détaché. À mesure que le débit augmentait, ou que l'on accroissait la profondeur de l'orifice, l'écoulement d'air entrait de nouveau en contact avec les parois de l'orifice avant de sortir. Ce comportement était instable et le flux pouvait être tour à tour en contact ou non avec les parois au même niveau de débit : ce changement de comportement pouvait modifier le débit par rapport au relevé des pressions et produire des effets d'hystérésis pendant un test.

Lorsque l'orifice est plusieurs fois plus profond que son diamètre, le flux se rattache uniformément aux parois de l'orifice et adopte un profil de vitesse stable. Le rattachement peut se produire à une distance aussi faible que 10 diamètres à partir de l'entrée, mais peut également requérir jusqu'à 100 diamètres [31]. Si le débit est assez lent, le jet d'air se comporte de façon laminaire et il se forme une distribution parabolique des vitesses. Lorsque le flux franchit un seuil de débit et devient turbulent, il se forme un profil plus émoussé selon la loi de la puissance. Pour les profonds orifices habituellement employés dans les bâtiments (c'est-à-dire, où le rapport t/d est inférieur à environ 8), le rattachement ne se produit pas pour des différences de pression supérieures à environ 0,1 pascal.

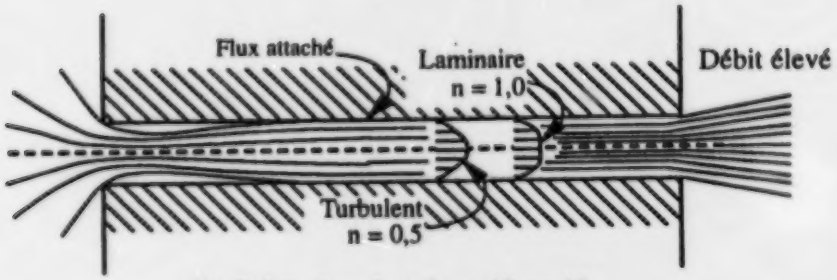
Les résultats du test de débit à l'état stable (tableau 2.1) ont montré que la théorie d'orifice simple (c'est-à-dire, $C_d = 0,61$ et $n = 0,5$) est relativement précise pour les orifices testés ayant un diamètre supérieur à 12 mm (t/d < 0,25), mais que les petits trous (t/d > 0,5) ont des valeurs C_d supérieures (c'est-à-dire, un débit plus élevé) que prévu. Ce comportement est prédit par la théorie et a été mesuré par d'autres chercheurs. En fait, les coefficients de débit mesurés pour les tests où t/d > 0,5 s'accordent bien avec une partie de la documentation [32]. Les résultats obtenus pour l'orifice de 15,8 mm Ø sont proches de la simple théorie, où les orifices de 12 mm, 6 mm et 3 mm ont des valeurs croissantes pour C_d avec des exposants de débit de près de 0,5. L'orifice de 1,5 mm Ø a un C_d plus petit que celui de l'orifice de 6 mm, mais l'exposant de débit est supérieur à 0,5; par conséquent, pour les très petits orifices, le débit à une pression donnée est proportionnellement supérieur à celui qui est prédit par la théorie de l'orifice simple.



(i) Orifice : t/d < 0,5



(ii) Débit à orifice profond : 10 < t/d < 0,5



(iii) Débit dans le tube : t/d >> 10

$$Q = C_d \cdot A_{ven\ t} \cdot \left(\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}\right)^n \qquad C_d = C_c \cdot C_v$$

Figure 2.5 : Comportement généralisé et observé d'un débit uniforme, à travers les orifices d'un bâtiment

Diamètre de l'orifice (d) x profondeur (t) [mm]	Profondeur (t) : Diamètre (d) (t/ d)	Gamme de pression [Pa]	Coefficient de débit (C_d)	Exposant de débit (n)
25,4 sur 3,0	0,12	5 - 250	0,652	0,503
22,65 sur 3,0	0,13	5 - 250	0,643	0,503
19,0 sur 90,0	4,73	5 - 250	0,673	0,498†
15,8 sur 3,0	0,19	5 - 500	0,675	0,503
12,0 sur 3,0	0,25	5 - 500	0,666	0,515
6,0 sur 3,0	0,50	5 - 75	0,804	0,493U
3,0 sur 3,0	1,00	5 - 500	0,894	0,507
3 (rebords réguliers) x 3	1,00	5 - 500	0,868	0,510
1,5 sur 3,0	2,00	5 - 500	0,789	0,537

Note : La régression linéaire est la plus adaptée à l'équation de débit $Q = C_d \cdot A \cdot (\Delta P)^n$. Théorie simple : $C_d = 0{,}611$, $n = 0{,}5$.

† La valeur de n ne peut théoriquement être inférieure à 0,5. Le bruit expérimental est la cause de ces valeurs.

Tableau 2.1 : Coefficients de débit dans des orifices à rebords aigus, déterminés à partir de tests à débit uniforme

Type d'orifice de maçonnerie (joint vertical de 10 sur 65 mm)	Coefficient de débit (C_d)	Exposant de débit (n)
Ouvert	0,626	0,555
Cell-Vent	0,089	0,720
Goodco	0,047	0,515
Yeovil	0,056	0,555
Avion	0,030	0,497

Note : La régression linaire est la plus adaptée à l'équation de débit $Q = C_d \cdot A \cdot (\Delta P)^n$. La surface est basée sur un joint de tête ouvert.

Tableau 2.2 : Coefficients de débit des orifices déterminés à partir de tests sur des pièces préfabriquées à encastrer (placage de maçonnerie)

L'exposant de débit commence à diverger par rapport à 0,5 pour le plus petit orifice, car le rapport t/d s'approche de 2, et, par conséquent, le flux se comporte légèrement davantage comme celui d'un tube laminaire (à noter que, pour le flux laminaire, n = 1,0), malgré le biseau des rebords aigus. L'orifice de brique et les pièces préfabriquées à encastrer examinés ci-dessous montrent aussi clairement comment l'exposant de débit indique si le flux est laminaire ou turbulent. Pour des rapports diamètre-épaisseur supérieurs à 2, le coefficient de débit semble se stabiliser vers 0,65 avec un exposant de débit de 0,50.

Le tube de 90 mm de profondeur s'est comporté remarquablement comme un orifice, car, parmi les différences de pression testées, on a observé que le flux ne se rattachait pas aux parois du tube. Le flux dans un tube de plus petit diamètre (disons, 3 ou 6 mm) pourrait s'être rattaché aux parois du tube et provoquer un débit plus laminaire (c'est-à-dire, n > 0,5).

L'orifice en brique ($C_d = 0,63$, $n = 0,56$), malgré son facteur de forme rectangulaire et sa profondeur, s'est comporté de façon très similaire à un gros orifice. Le coefficient de débit pour les pièces préfabriquées à encastrer en brique n'a pas été calculé, car il est difficile de mesurer la surface des ouvertures dans les pièces. À la place, on a calculé un coefficient de débit équivalent en se basant sur la surface globale de l'orifice (10 mm sur 65 mm). Ce mode de présentation est également plus utile pour comparer l'efficacité de ventilation des différents produits, les uns avec les autres, ainsi qu'à un joint vertical ouvert.

L'exposant de débit, calculé à partir des résultats des tests effectués sur les orifices ouverts en brique, montre que le flux commence à différer légèrement par rapport à un flux turbulent parfait, presque sûrement à cause de la profondeur de l'orifice. À de très faibles différences de pression (beaucoup moins que 1 Pa), l'exposant de débit devrait vraisemblablement être plus élevé, car le flux se rattachera aux parois des orifices.

Le coefficient de débit et l'exposant de débit des pièces préfabriquées à encastrer sont présentés au tableau 2.2. Il n'est pas étonnant que le Cell-Vent (n = 0,72), constitué essentiellement d'une série de tubes carrés de 1 mm sur 90 mm de longueur, se comporte d'une manière beaucoup plus proche d'un flux laminaire que toutes autres configurations. Les autres pièces préfabriquées ne modifiaient pas sensiblement la nature du débit.

Les résultats des tests effectués sur les pièces préfabriquées à encastrer, disponibles dans le commerce, montrent que toutes les insertions limitaient nettement la circulation de l'air. La meilleure pièce préfabriquée, le Cell-Vent, limitait le flux à moins de 15 % de la valeur ordinaire, à travers un joint vertical ouvert. Le Goodco, le Yeovil et le modèle de style avion limitaient tous le flux à une proportion de 5 à 8 %, à travers un orifice sans obstruction. Comparez les courbes du débit à la pression dans divers orifices de brique, illustrés à la figure 2.6. Il est clair que la restriction du débit, présente dans toutes les pièces préfabriquées à encastrer, pouvait avoir de graves conséquences négatives à la fois sur la ventilation et sur la modération de pression.

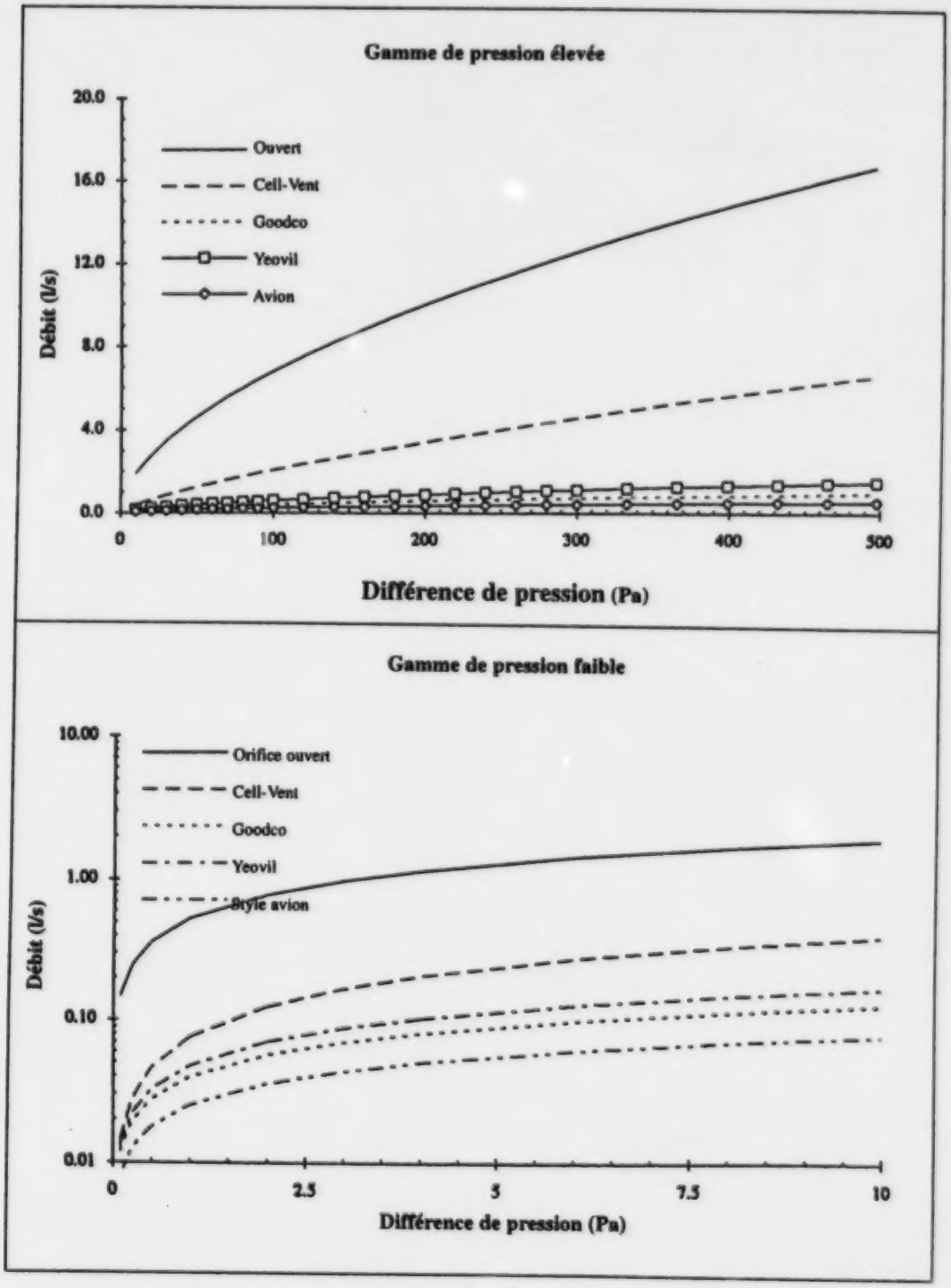


Figure 2.6 : Résultats des tests de pression statique (orifices des murs de maçonnerie)

2.4 Tests de pression dynamique dans les orifices

Une série de tests a également été menée, le plus souvent sur des modèles d'orifice de briques, pour quantifier les différences dans le comportement du débit, entre les différences de pression statique et dynamique, à travers les orifices. En utilisant comme données les résultats du débit à l'état stable, nous avons comparé les résultats obtenus par les tests dynamiques aux prédictions, pour tenter de quantifier les différences entre le comportement dynamique et le comportement à l'état stable.

Les mesures de pression dynamique sont difficiles à effectuer, surtout pour les faibles pressions et les hautes fréquences. Elles exigent un transducteur de pression électronique réceptif, précis et rapide, ainsi qu'un système rapide d'acquisition des données. On a obtenu une résolution d'environ 0,5 Pa et d'une milliseconde.

2.4.1 Objectifs

Pour tenter de mesurer le rendement dans des conditions comparables à celles qui prédominent en service, on a tenu compte des effets de plusieurs facteurs (différentes amplitudes et fréquences de pression, ainsi que de multiples débits moyens) sur le débit des orifices. Étant donné que la chute de pression se produisant à l'ouverture de l'orifice varie d'une manière non linéaire (c'est-à-dire, de façon linéaire avec la racine carrée de P), l'amplitude de la variation de pression aura un effet, tout comme la vitesse moyenne du débit d'air à travers le trou de l'orifice (c'est-à-dire, à cause des fuites d'air dans la paroi interne d'un mur). Le comportement de plusieurs types d'orifices de brique a été mesuré pour trois différentes oscillations de fréquences (1, 0,5, 0,2 Hz), à trois différentes amplitudes moyennes de pression (0, 100, 300 Pa). Par conséquent, la série de tests dynamiques comprenait neuf tests pour chacun des cinq orifices de brique. La série de tests est résumée au tableau 2.3. À cause de la restriction de débit causée par la plupart des pièces préfabriquées à encastrer, il a été impossible de procéder à des tests à haute fréquence (c'est-à-dire pour des périodes d'une et de deux secondes), sans générer des pressions supérieures à 1 250 Pa (la pression maximale mesurable avec notre équipement).

2.4.2 Appareils

Les appareils de test dynamiques des orifices comprenaient un tube (de même diamètre que celui du test statique), un piston en aluminium rigide, ainsi qu'un mécanisme d'entraînement qui imprimait au piston un mouvement de va-et-vient (figure 2.7 et 2.8). Le tube employé était plus court que celui utilisé pour les tests de pression statique, afin de réduire le plus possible le volume de l'air et ainsi assurer une réaction très rapide de la pression négative aux mouvements du piston. L'instrumentation comprenait des transducteurs de pression électroniques et rapides (de la gamme de ± 12,5, 250 et 1 250 Pa, avec un délai de réponse d'environ 5 ms), un capteur de déplacement à courant continu (avec un délai de réponse >> 2 kHz) ainsi qu'un système d'acquisition de données à haute vitesse (2 kHz). L'orifice est attaché à l'extrémité libre du tube, et l'on utilise le même ventilateur et le même débitmètre que ceux des tests statiques, pour appliquer une différence moyenne de pression. La pression arrière du débitmètre et du ventilateur était assez élevée pour que les oscillations dynamiques du côté en aval occasionnent des variations de flux de moins de 5 % du débit appliqué. Les appareils pouvaient produire des fréquences supérieures à 5 Hz et des pressions maximales de 2 000 Pa.

Type d'orifice	Pression appliquée (Pa)	Période (s) 1	2	5
Orifice ouvert	0	√	√	√
(10 sur 65 mm)	-100	√	√	√
	-300	√	√	√
Cell-Vent	0	√	√	√
	-100	√	√	√
	-300	√	√	√
Goodco	0	>	>	√
	-100	>	√	√
	-300	√	√	√
Yeovil	0	>	>	√
	-100	√	√	√
	-300	√	√	√
Style avion	0	>	>	√
	-100	>	√	√
	-300	>	√	√
Orifice	100	√	√	√
22,6 Ø mm	0	√	√	√
	100	√	√	√
Tube	-100	-	√	√
19 Ø sur 90 mm	0	√	√	√
	100	√	-	√
Orifice	0	√	-	-
25,4 Ø mm				

Notes : √ montre que le test a eu lieu
> montre que les pressions du test dépassaient ± 1 250 pascals
- test non effectué

Tableau 2.3 : Série de tests sur la pression dynamique dans les orifices

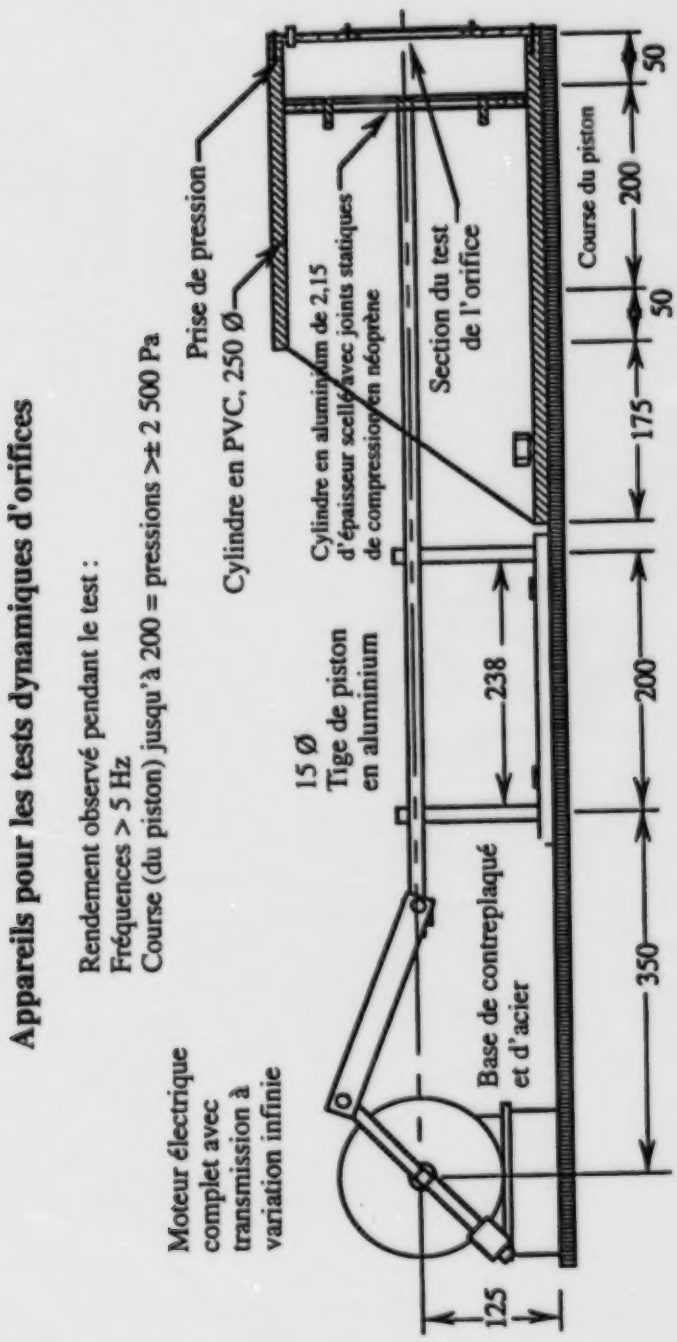


Figure 2.7 : Appareils de test de pression dynamique dans des orifices

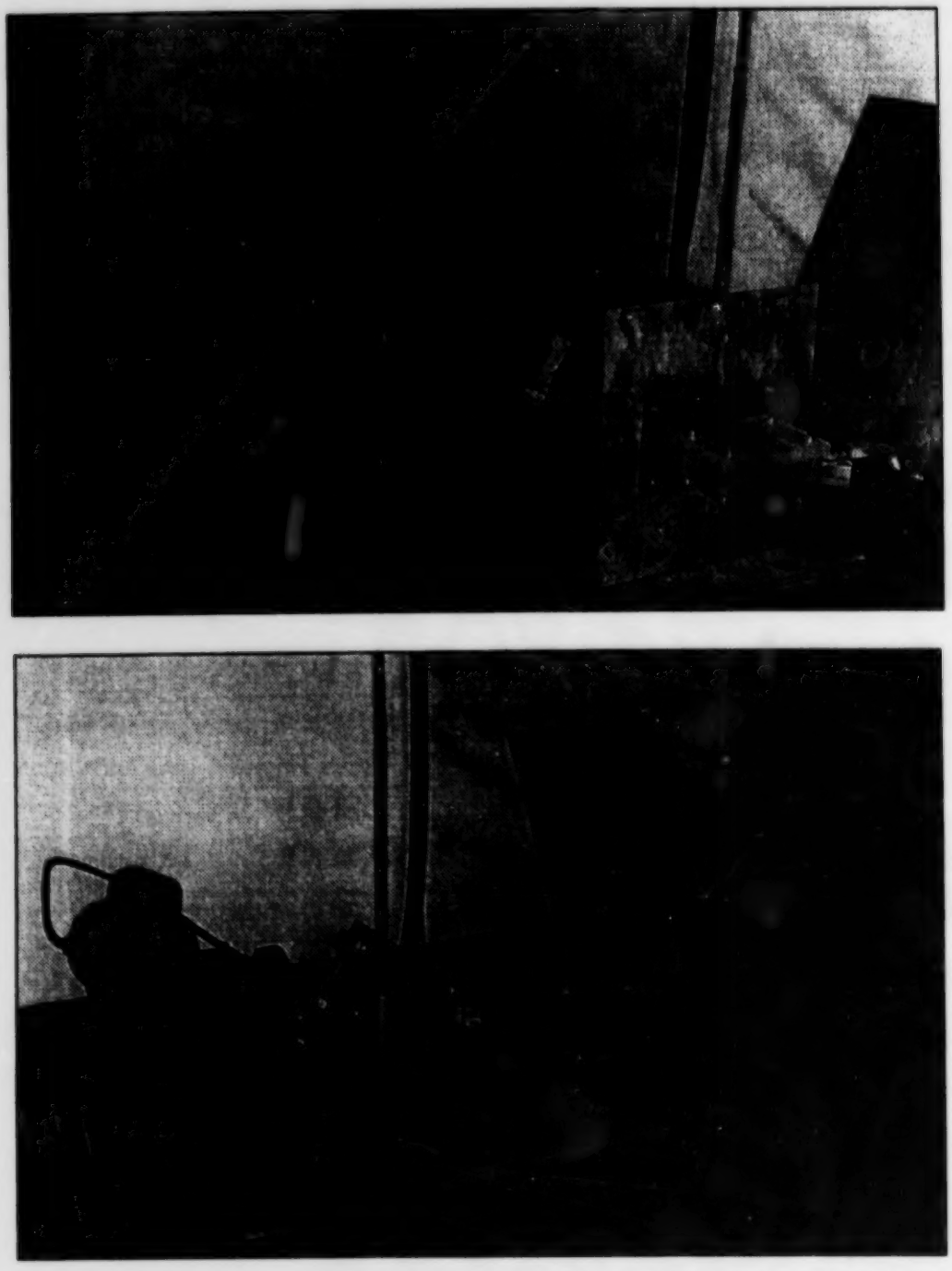


Figure 2.8 : Photo des appareils de tests de pression dynamique dans des orifices

2.4.3 Procédure

Avant chaque test dynamique, on a mesuré les fuites du système et on les a ramenées à zéro, si possible. On a appliqué une différence de pression (le cas échéant), commencé l'acquisition de données et, après une pause d'environ 0,5 seconde, on a mis en marche la machine pour le test de pression dynamique applicable à l'orifice. La courte pause a fourni un relevé précis de la valeur zéro de tous les transducteurs.

2.4.4 Résultats

Les appareils expérimentaux servant aux tests dynamiques ont produit des résultats excellents et répétés. Cependant, il est difficile d'interpréter les résultats.

En comparant les mesures de déplacement et de pression, on a établi que le délai entre l'application du déplacement et l'augmentation de la pression était très faible : moins de 10 ms. Cette conclusion correspond aux prédictions théoriques basées sur la compressibilité de l'air, et suggère également que les modèles de résonateur de Helmholtz (qui prédisent une différence de pression sur l'écran à cause du délai de la réponse en pression) prédisent probablement mal le rendement de la modération de pression.

On a rédigé un programme informatique pour simuler les variations de pression dans les appareils de test dynamiques. Le programme calcule le débit à travers un orifice et la pression dans un cylindre, à de nombreuses petites étapes, étant donné des valeurs établies pour C_d et n. La course et la fréquence ont été résumées à partir des mesures enregistrées. Le programme a calculé la pression dans la chambre en utilisant la surface mesurée de l'orifice soumis au test. On a employé quatre modes de calcul :

1) usage des valeurs théoriques C_d et n (c'est-à-dire, $C_d = 0{,}611$ et $n = 0{,}5$);
2) usage des valeurs C_d et n provenant des tests de pression statiques (tableaux 2.1 et 2.2);
3) choix d'un C_d le mieux adapté aux données (particulièrement les données maximales et minimales), utilisant un exposant de débit de 0,5;
4) choix d'une combinaison de C_d et de n la mieux adaptée aux données.

Le tableau 2.4 résume les résultats des mesures et des calculs. Ceux-ci montrent que, sous des pressions dynamiques, le débit à travers tous les orifices est considérablement supérieur (et, par conséquent, la pression du cylindre est plus faible) que l'on pourrait le prédire en utilisant la théorie simple d'orifice et en mesurant les valeurs du débit statique.

Test	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Période (s)	1,11	2,34	5,51	1,25	2,35	5,61	1,21	2,41	6,14
Course (pouces)	1,94	1,94	2,10	1,93	1,88	1,87	1,92	1,95	1,85
Amplitude (Pa)	130	44	11	180	95	42	320	173	73
Maximum (Pa)	125	38	11	22	-11	-51	-40	-135	-217
Minimum (Pa)	-135	-50	-12	-339	-201	-135	-680	-482	-363
Pression appliquée (Pa)	0	0	0	-91	-86	-89	-289	-291	-288
Calcul du C_d pour n = 0,5	1,37	1,14	0,97	1,20	1,04	0,90	1,09	0,98	0,89
C_d pour n = 0,555	1,04	0,90	0,82	0,82	0,75	0,67	0,74	0,68	0,63

Sommaire des tests dynamiques sur les orifices en brique ouverts

Test	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Période (s)	1,13	2,29	6,14	1,11	2,38	5,22	1,18	2,33	5,71
Course (pouces)	1,96	1,93	1,90	1,97	1,94	1,91	2,09	1,94	1,93
Amplitude (Pa)	623	209	59	254	141	60	389	228	99
Maximum (Pa)	598	200	58	120	2	-51	23	-109	-219
Minimum (Pa)	-647	-217	-61	-389	-280	-172	-755	-566	-416
Pression appliquée (Pa)	0	0	0	-101	-101	-101	-310	-319	-315
Calcul du C_d pour n = 0,5	0,14	0,15	0,14	Une valeur simple n'a pas pu être trouvée pour correspondre aux résultats mesurés					

Sommaire des tests dynamiques sur Cell-Vent

Test	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Période (s)			5,76		2,29	5,71	1,11	2,34	5,90
Course (pouces)			1,94		1,93	1,91	1,94	1,96	1,91
Amplitude (Pa)			611		195	71	615	273	104
Maximum (Pa)			594		34	-52	296	-65	-213
Minimum (Pa)			-627		-356	-194	-934	-611	-421
Pression appliquée (Pa)			0		-97	-94	-238	-303	-293
Calcul du C_d pour n = 0,5			0,11	Une valeur simple n'a pas pu être trouvée pour correspondre aux résultats mesurés					

Sommaire des tests dynamiques sur les orifices Goodco

Test	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Période (s)			5,32	1,06	2,15	5,31	1,06	2,16	5,24
Course (pouces)			1,92	1,94	1,95	1,92	1,94	1,95	1,93
Amplitude (Pa)			303	379	128	44	491	221	86
Maximum (Pa)			290	267	28	-51	164	-60	-212
Minimum (Pa)			-315	-490	-227	-140	-818	-501	-383
Pression appliquée (Pa)			0	-100	-103	-101	-311	-313	-309
Calcul du C_d pour n = 0,5			0,14	Une valeur simple n'a pas pu être trouvée pour correspondre aux résultats mesurés					

Sommaire des tests dynamiques sur les plateaux d'orifice Yeovil (10 sur 65 sur 90)

Test	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Période (s)			5,53		2,22	5,62		2,21	5,47
Course (pouces)			1,91		1,94	1,92		1,96	1,92
Amplitude (Pa)			434		141	42		171	76
Maximum (Pa)			423		30	-52		-102	-215
Minimum (Pa)			-444		-253	-136		-443	-368
Pression appliquée (Pa)			0		-103	-96		-339	-301
Calcul du C_d pour n = 0,5			0,16	Une valeur simple n'a pas pu être trouvée pour correspondre aux résultats mesurés					

Sommaire des tests dynamiques sur les orifices de style avion

Tableau 2.4 : Résultats des tests sur la pression dynamique dans les orifices

2.4.5 Discussion

Un important résultat de la série de plus de 50 tests est qu'il est impossible de prédire facilement le débit dynamique traversant les orifices, en utilisant seulement les valeurs C_d et n à l'état stable et la compressibilité de l'air. Pour les tests sans différence de pression appliquée (débit moyen = 0), une valeur approximative de C_d peut toujours être choisie pour correspondre aux données. Cependant, pour les tests présentant un débit moyen imposé, aucune valeur unique de C_d ne correspondrait à certains des résultats, même approximativement.

Pour des fréquences plus faibles, les valeurs de C_d les plus adaptées convergent lentement vers la valeur du C_d à l'état stable pour l'orifice ouvert (voir la figure 2.9). Il est surprenant que la valeur du C_d à la fréquence relativement lente de 0,2 Hz soit encore de beaucoup supérieure à celle que la théorie suggérerait. La différence de pression moyenne appliquée avait également une influence sur la relation entre le C_d et la fréquence.

Nous n'avons découvert aucune raison théorique majeure pour le comportement observé du débit de l'orifice sous des pressions dynamiques. Il y a plusieurs explications complexes potentielles : l'inertie, les interactions de débit avec le réservoir infini à l'extérieur de l'orifice, et peut-être un type d'effet annulaire de Richardson (une distribution non parabolique du débit parfois observée dans le débit d'un tube oscillant [31]). L'absence d'hystérésis dans les résultats semble éliminer les effets d'interaction avec le réservoir, mais l'inertie est une force probable dans les expériences à grande amplitude menées. Il pourrait être possible d'inclure certains de ces effets dans une simulation informatique, bien que les éléments physiques et mathématiques nécessaires ne soient pas facilement disponibles.

Les seuls travaux similaires de recherche trouvés dans la documentation ne donnent pas beaucoup de détails sur cette situation. Dans Daily et col. [33], les auteurs concluent que « pour un jet intense, obtenu avec de faibles rapports orifice-diamètre du tube, il semble que l'instabilité produise une structure interne de débit qui ne soit plus comparable à aucune condition à l'état stable ».

Il est réellement possible qu'une condition à l'état stable (c'est-à-dire, laminaire ou turbulente) ne se soit pas formée dans nos expériences, ou que le débit ait pris de nombreuses formes différentes. Une obturation d'air peut avoir été accélérée au début de la hausse de pression, et le débit pourrait adopter un profil de vitesse émoussé, car l'effet de la friction le long des parois de l'orifice n'aurait pas le temps de se manifester. Ce comportement expliquerait les débits supérieurs aux prévisions. Plus loin pendant le cycle, un profil de débit laminaire ou turbulent (voir la figure 2.5) pourrait prendre forme, et être détruit lorsque le débit se ralentit jusqu'à la valeur de zéro (c'est-à-dire, jusqu'à devenir presque stationnaire ou rampant). Les effets de l'inertie joueraient un rôle près du milieu de l'orifice, mais la friction aurait un effet plus important le long des parois.

Yamaguchi [34] a pu prévoir les résultats d'un débit oscillant à travers un orifice, mais le diamètre orifice-tube était gros, de la gamme de 0,5, et le débit oscillant était faible en comparaison avec le débit moyen. Dans le cas de nos expériences, le diamètre orifice-tube était inférieur à 0,1 et le

débit oscillant était égal à plusieurs fois le débit moyen. Inculet [3] a étudié des modèles à l'échelle d'orifices circulaires à rebords aigus avec des coefficients de débit statique de 0,65 et un exposant de débit de 0,5. Même si elle a eu énormément de succès en assortissant les résultats à la théorie (en incluant les effets de l'inertie), les mesures prises avec un débit moyen imposé nécessitaient une « hypothèse » judicieuse pour le C_d en fonction de la théorie, et il fallait choisir plusieurs autres facteurs.

Il faut se rappeler que, dans des conditions pratiques, les différences de pression dynamique d'un orifice à l'autre sont beaucoup plus faibles que celles appliquées pendant ces expériences, de sorte que l'inertie jouerait un rôle relativement plus limité. Les recherches futures devraient tenir compte des fluctuations de pression plus faibles (par exemple, 10 Pa), susceptibles de se produire plus souvent sur place, et de fréquences inférieures à 0,2 Hz, car, même à ce faible taux de variation, les orifices ne se comportaient pas comme prévu.

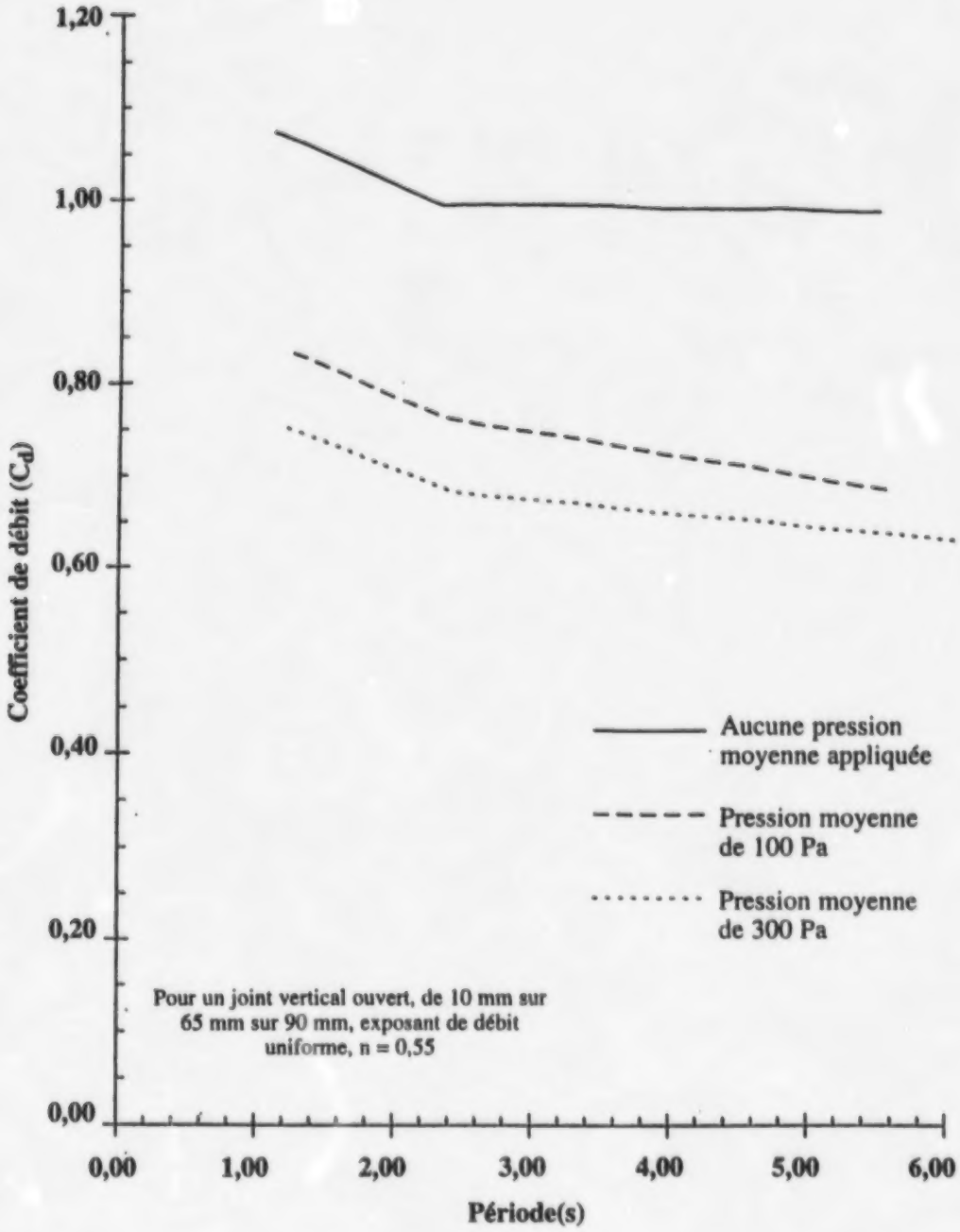


Figure 2.9 : Coefficients de débit dynamiques d'orifices, en fonction de la fréquence

3. Forces motrices de la ventilation

Dans ce chapitre, les forces motrices qui actionnent le débit massique de l'air à travers une cavité, sont indiquées et décrites. Notre intention est de documenter, de quantifier et d'examiner l'importance relative de celles-ci et des variables influant sur les forces motrices de ventilation.

Il y a deux principales forces motrices pour la ventilation : la poussée thermique (effet cheminée) et les pressions du vent. Les forces secondaires peuvent être le mouvement de l'air à travers le mur, le pompage thermique et du vent, ainsi que les effets de la poussée attribuable à l'humidité.

3.1 Effets thermiques

Le rayonnement solaire peut causer, dans l'écran pare-pluie, des températures de plus de 40 °C au-dessus de la température ambiante, dans certaines conditions. L'énergie thermique est transférée à l'air de la cavité, ce qui réduit sa densité. Lorsque le soleil se couche ou traverse la face du mur, l'écran perd sa chaleur vers l'extérieur jusqu'au lendemain, lorsque le cycle recommence. L'effet de la température sur la densité de l'air peut générer de faibles mais importantes pressions de ventilation.

3.1.1 Poussée thermique (effet cheminée)

La différence de densité entre l'air extérieur et celui de la cavité entraîne une poussée et une différence de pression. Ce phénomène de poussée est souvent appelé «effet cheminée».

La densité de l'air varie selon la température, à peu près en fonction de l'équation suivante :

$$\rho_a = \frac{351{,}99}{T_a} + \frac{344{,}84}{T_a^2}$$

où T est la température en degrés Kelvin et ρ_a est la densité en kg/m^3.

Plus la colonne d'air de la cavité est haute, plus la différence de pression peut être marquée. En pascals, la différence de pression entraînée par un écart de température (voir la figure 3.1), entre l'air de la cavité et celui de l'extérieur, est de [29] :

$$\Delta P = \left[\left(\frac{352{,}0}{T_c} + \frac{344{,}8}{T_c^2}\right) - \left(\frac{352{,}0}{T_o} + \frac{344{,}8}{T_o^2}\right)\right] \cdot h \cdot 9{,}81$$

ou, plus approximativement, à une température et une pression standard,

$$\Delta P = 3\,465 \cdot \Delta h \cdot \left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_c}\right)$$

où T est en degrés Kelvin, la pression est exprimée en pascals, et h, la distance verticale entre les ouvertures d'orifices, est en mètres.

Dans la figure 3.2, la pression résultante attribuable à la poussée thermique est illustrée en fonction de l'écart de température sur l'écran, et de la hauteur verticale entre les orifices (à une température extérieure présumée de 15 °C; la température extérieure présumée a peu d'effet sur le résultat).

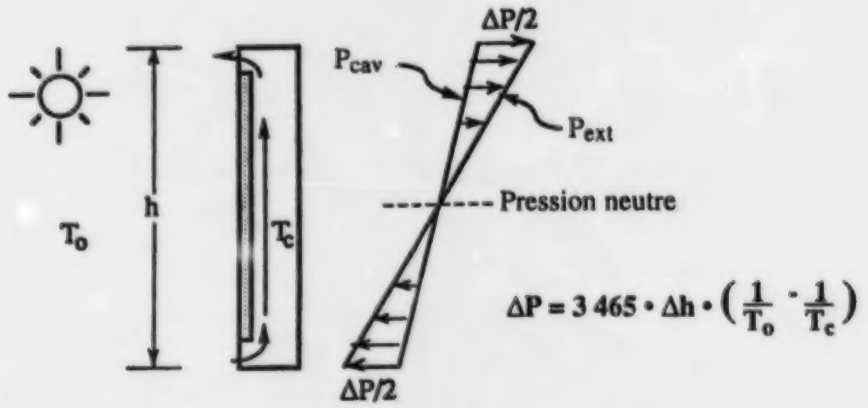


Figure 3.1 : Poussée thermique

Le tableau 3.1 donne une idée des pressions attribuables aux écarts de température. En général, la cavité sera plus chaude que l'air extérieur. Cependant, pour un revêtement léger, le rayonnement nocturne peut entraîner une chute de température pouvant aller jusqu'à 3 à 5 °C en dessous du niveau ambiant. Pour la plupart des types de placages, l'écart de température sera souvent de 10 °C, occasionnellement de 30 °C, et le plus souvent d'au moins 3 °C.

Pour un écart de température de 10 °C entre l'air extérieur et celui de la cavité, la différence de pression entre le haut et le bas de la cavité, en raison de la poussée, pour une cavité typique de 2,4 m de hauteur, est d'environ 1 Pa. Pour les hautes cavités, la pression sera proportionnellement plus élevée. Toutefois, si l'on prévoit une ventilation suffisante, la température de la cavité baissera à mesure que l'énergie thermique sera enlevée par l'air de ventilation. Dans les climats chauds, on peut tirer partie de ce comportement pour réduire les charges imposées à la climatisation.

Pour une température extérieure de 0 °C Hauteur de cavité (m)	*Différence de température (cavité et extérieur)*		
	±3 °C ΔP (Pa)	10 °C ΔP (Pa)	30 °C ΔP (Pa)
2,4	0,33	1,08	3,02
3,0	0,41	1,34	3,77
3,6	0,49	1,61	4,53
4,8	0,66	2,15	6,03
6,0	0,83	2,69	7,54

Tableau 3.1 : Pressions de ventilation calculées attribuables à la poussée thermique

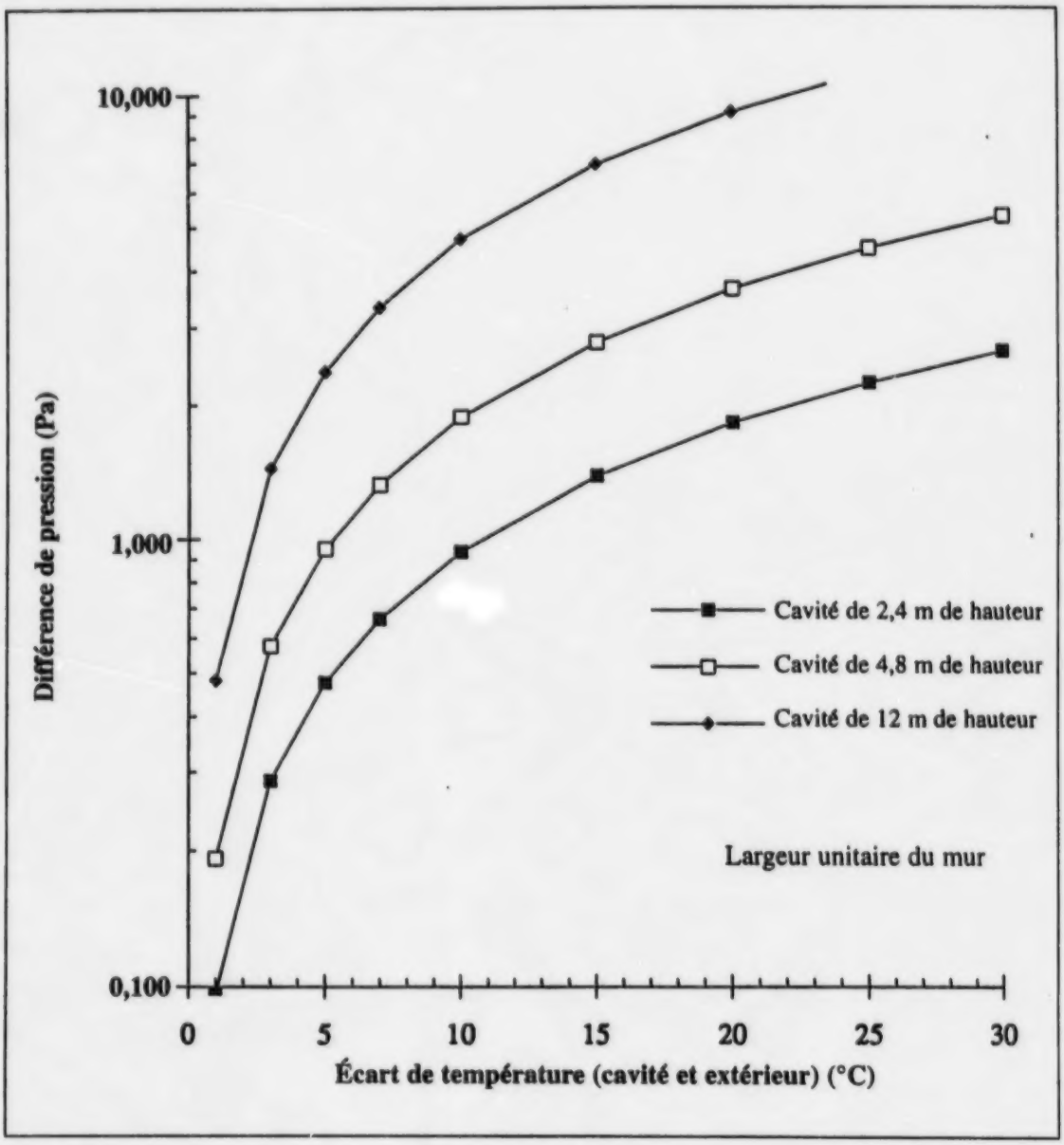


Figure 3.2 : Pression de ventilation par rapport à l'écart de température et à la hauteur de la cavité

La figure 3.3 illustre la température enregistrée pendant les essais sur place par le BEG, dans un mur typique à placage de maçonnerie de brique orienté vers l'ouest, présentant une cavité de 30 mm de profondeur et de 2,4 m de hauteur. La température de la cavité murale est surtout influencée par le rayonnement solaire, et est plus de 10 °C au-dessus de celle de l'extérieur, durant plusieurs heures par jour. En moyenne, l'air de la cavité avait une température de 6 °C au-dessus de la température ambiante durant tout l'été, ce qui indique une pression moyenne de ventilation de 0,75 Pa pour une période de plusieurs mois. Même pendant les deux mois les plus froids de l'hiver, la cavité murale avait une température de 5 °C de plus que la température ambiante.

L'orientation et l'exposition auront un important effet sur la fréquence et la durée des pressions de poussée, et, par conséquent, sur leur importance. Les murs orientés vers le nord présentent en moyenne des différences de température beaucoup plus faibles sur l'écran. La nature de l'écran (surtout sa conductivité thermique, sa couleur et sa masse de stockage thermique) influera également sur la valeur des températures de pointe et moyennes.

3.1.2 Pompage thermique

Le cycle quotidien de chauffage et de refroidissement de l'air dans la cavité produira un cycle diurne d'expansion et de contraction du volume de l'air dans la cavité. À mesure que l'air prend de l'expansion, il est expulsé des orifices et de toutes autres ouvertures (y compris les petits pores et les fissures du placage). En utilisant l'équation de la densité de l'air en fonction de la température, on peut calculer le volume de mouvement d'air à travers la cavité, en raison de l'expansion et de la contraction. Selon la gamme typique de températures de l'air constatées dans les bâtiments, le changement de densité de l'air est presque linéaire et, tout comme pour la poussée thermique, on peut trouver une équation simplifiée :

$$\Delta V = \frac{3{,}546 \cdot \Delta T \cdot V}{1\,000}$$

où ΔV est le changement du volume de la cavité, V, attribuable à la hausse (ou la baisse) de la température de la cavité de ΔT (en degrés Kelvin).

Notez que l'influence de ce mécanisme de ventilation, parfois appelé pompage thermique, est indépendante du volume de la cavité, de la surface de ventilation, etc. Dans tous les cas pratiques, l'échange de masse d'air attribuable au pompage thermique est très petit sur le plan volumétrique. Par exemple, pour une largeur en mètres correspondant à une cavité de 2,5 m de hauteur et de 5 mm de profondeur, une augmentation de température de 30 °C entraînera l'expulsion de :

$$3{,}546 \cdot 30 \cdot (2{,}5 \cdot 0{,}025) \div 1\,000 = 0{,}00665 \text{ m}^3 = 6{,}65 \text{ litres.}$$

Étant donné que cela se produit une seule fois par jour, le taux de ventilation équivalent est de 0,000077 litre par seconde!

Même si le pompage thermique entraîne le mouvement d'un très faible volume d'air, il se produit dans tous les murs, quelles que soient les dimensions des surfaces d'orifice intentionnelles. Pour les murs sans orifice, un échange d'air aura quand même lieu à moins que le placage ne soit parfaitement étanche à l'air (ce qui n'est pas le cas en pratique) ou ne soit très souple.

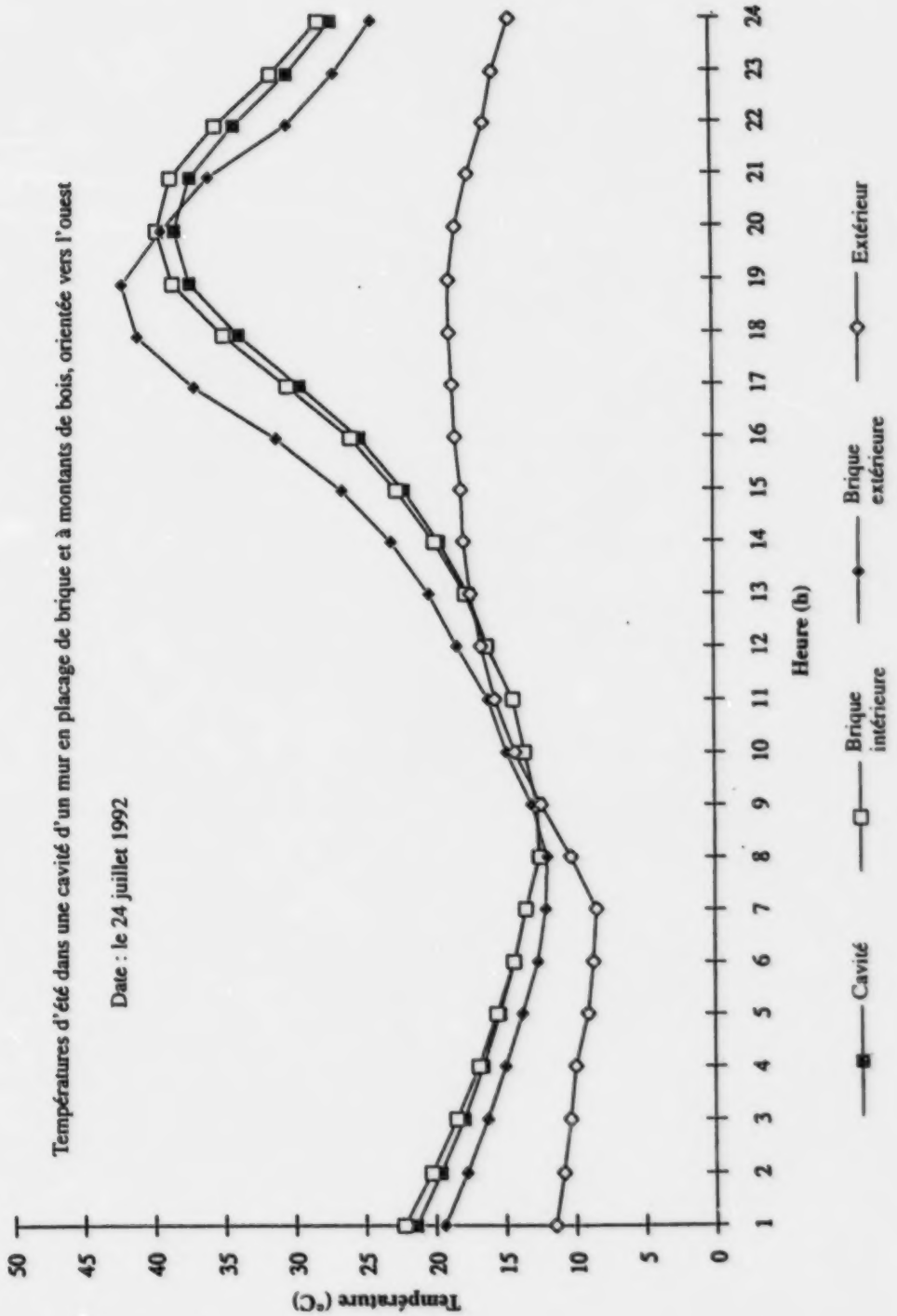


Figure 3.3 : Températures représentatives sur l'écran d'un mur à placage de brique

3.2 Effets du vent

Les pressions du vent sont souvent plus importantes pour la ventilation que les pressions thermiques; ce fait a été confirmé par la plupart des recherches examinées à la section 1.8. Lorsque le vent souffle, des gradients de pression se forment sur toutes les surfaces d'un bâtiment. Ils sont imputables au gradient vertical de la vitesse du vent (c'est-à-dire que la vitesse du vent augmente avec la hauteur), ainsi qu'aux gradients horizontaux et verticaux qui se forment à mesure que le vent souffle autour d'une structure (figure 3.4). En termes relatifs, les gradients verticaux seront plus prononcés sur des bâtiments courts et trapus, et les gradients horizontaux seront plus importants pour les bâtiments hauts et minces.

Les orifices séparés, même par une faible distance, seront exposés à des pressions différentes, en raison de ces gradients de pression. La différence de pression entre les deux emplacements d'orifice peut fort bien causer un débit d'air de ventilation (figure 3.5). La ventilation peut se produire à travers deux orifices séparés horizontalement ou verticalement.

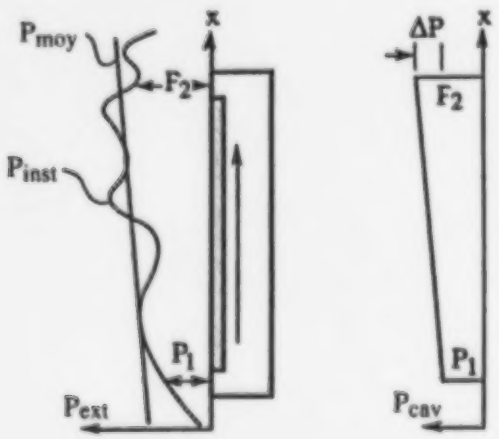
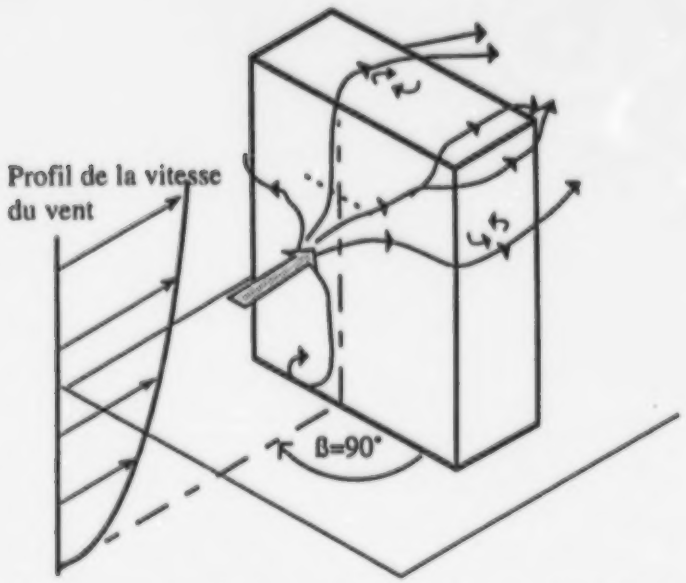


Figure 3.4 : Vent, circulation d'air et gradients de pression sur un bâtiment

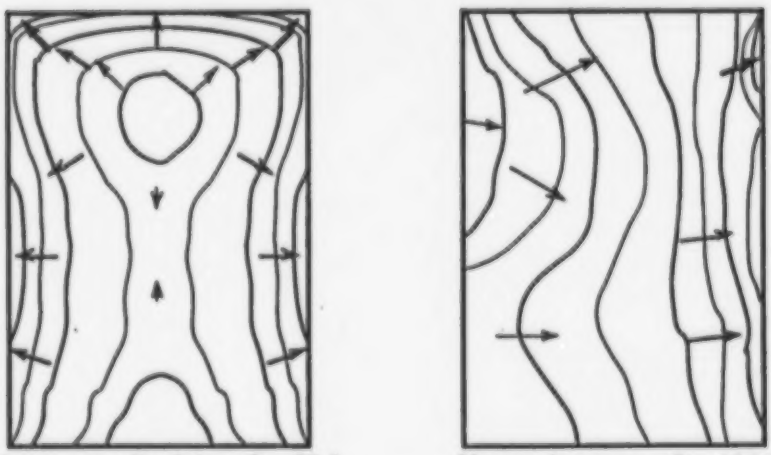
Comme l'indique la figure 3.5, il y a un gradient moyen relativement constant et un gradient instantané à court terme presque aléatoire. En raison de ces gradients spatiaux, un mur à écran à modération de pression devrait idéalement posséder une cavité en compartiments. Si l'on installe plus d'un orifice pour chaque compartiment dans un tel mur, il est possible que des débits importants d'air se produisent dans le compartiment; même si le CNRC suggère qu'un seul orifice est idéal, ce n'est pas nécessairement le cas (voir la section 1.6).

En présumant des conditions standard de température et de pression fixées par le CNRC, on peut calculer comme suit la pression de stagnation du vent :

$$P_{stagnation} = 0{,}647 \cdot v^2$$



Écoulements laminaires du vent sur la face d'un bâtiment



Vent perpendiculaire : ß = 90 ° Vent trois-quarts : ß = 135 °

Distributions de la pression et débits secondaires moyens du côté exposé au vent

Figure 3.5 : Pressions de ventilation causées par le vent

où la vitesse du vent, v, est exprimée en m/s, et

la pression de stagnation du vent, $P_{stagnation}$, est en pascals.

La vitesse du vent, tout comme la pression, varie avec la hauteur. Les tableaux météorologiques indiquent généralement la vitesse du vent à une hauteur de 10 m au-dessus du niveau du sol. On peut évaluer la vitesse moyenne du vent à z mètres au-dessus du niveau du sol, en utilisant la méthode simple du supplément du *Code national du bâtiment* :

$$V_z = (\frac{z}{10})^{0.1} \cdot V_{10}$$

où V_z est la vitesse à z mètres au-dessus du niveau du sol, et V_{10} est la vitesse à 10 mètres au-dessus du niveau du sol.

La pression statique équivalente exercée par le vent, sur la face d'un immeuble, est souvent exprimée comme fraction d'une certaine pression de référence, habituellement soit la pression de stagnation au sommet de l'immeuble (hauteur des avant-toits pour les bâtiments à toiture inclinée), soit celle qui est exercée à 10 mètres au-dessus du sol. Cette fraction (ou ce coefficient de pression) peut être illustrée sur toute la surface d'un immeuble, pour différentes conditions de vent. Le coefficient de pression, Cp, est défini comme suit :

$$Cp = \frac{P}{P_{stagnation}}$$

Les gradients moyens de pression sur de nombreux immeubles différents ont été étudiés en profondeur. Les coefficients moyens de pression prévus pour différents types de bâtiment sont indiqués aux figures 3.6 à 3.8. (Notez que, dans ce contexte, la moyenne est «une durée assez longue», habituellement de 15 minutes à une heure). Dans des limites raisonnables, on peut établir une échelle des lignes de pression égales dans ces figures, en fonction des dimensions de l'immeuble. Cette échelle sous-entend que, plus l'immeuble est gros, plus la variation de pression sera faible pour une hauteur d'étage fixe. Par conséquent, des pressions de ventilation exercées sur une hauteur d'étage, sur un bâtiment exposé de trois étages, seront sans doute beaucoup plus élevées que pour un immeuble de trente étages ayant le même facteur de forme.

Un immeuble d'appartements rectangulaire typique aura un coefficient de pression d'une valeur de 0,7 ou 0,8 près du centre, celle-ci baissant rapidement à 0 ou moins près des rebords, lorsqu'exposée à l'action d'un vent perpendiculaire à la face. Si l'angle du vent est de 45 °C, les pressions moyennes maximales pourront être légèrement inférieures et seront réduites à zéro ou moins aux rebords. Les murs parallèles au débit du vent seront généralement soumis à des pressions négatives (qui peuvent être tout aussi efficaces pour la ventilation que les pressions positives) avec d'importants gradients. Les pressions exercées sur les côtés sous le vent seront négatives et plus uniformes que sur les autres côtés. Une récente étude en soufflerie parrainée par la SCHL [35, 36] et portant sur les gradient moyens de pression à la surface de modèles représentant de gros immeubles locatifs, effectuée par le Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory de l'University of Western Ontario, donne des renseignements très utiles sur l'envergure potentielle des pressions exercées par la ventilation.

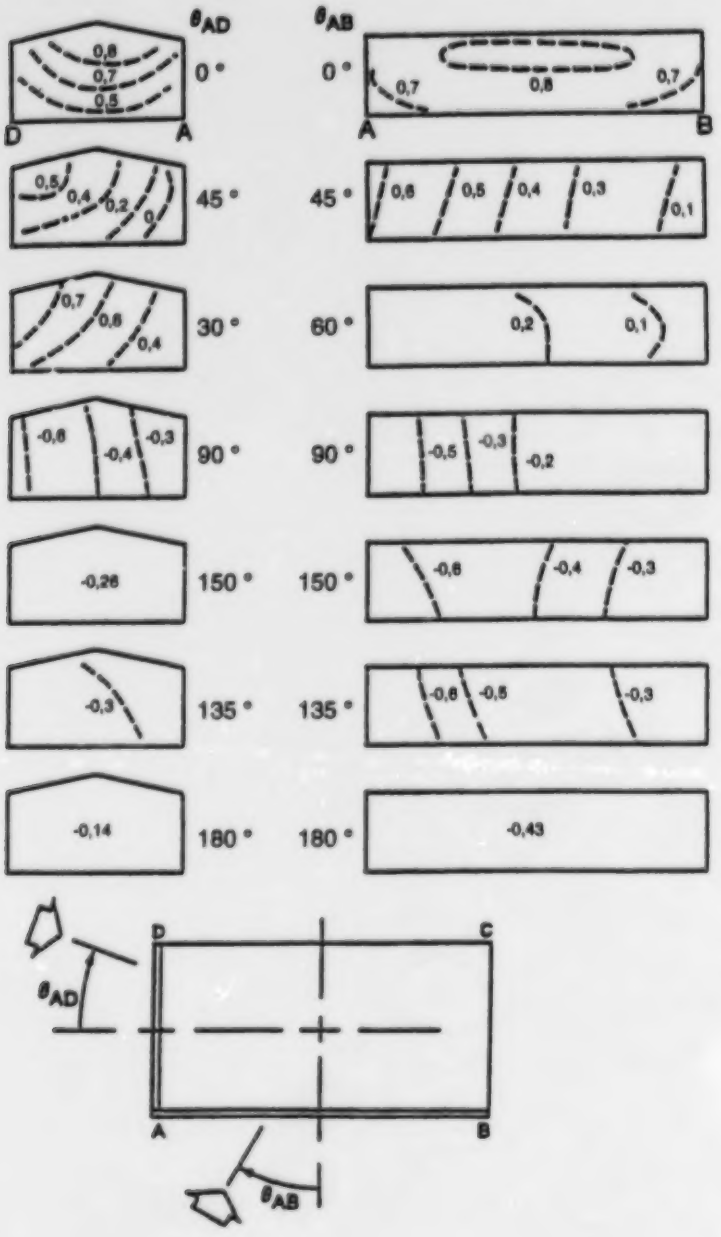


Figure 3.6 : Gradients de pression moyens sur un bâtiment de faible hauteur [37]

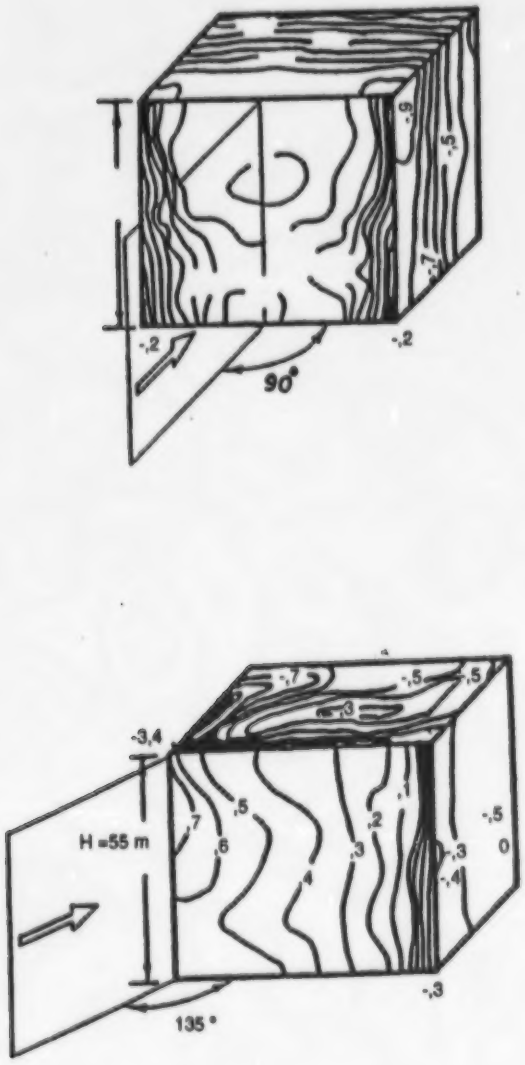


Figure 3.7 : Gradients de pression moyens sur un bâtiment de moyenne hauteur [38]

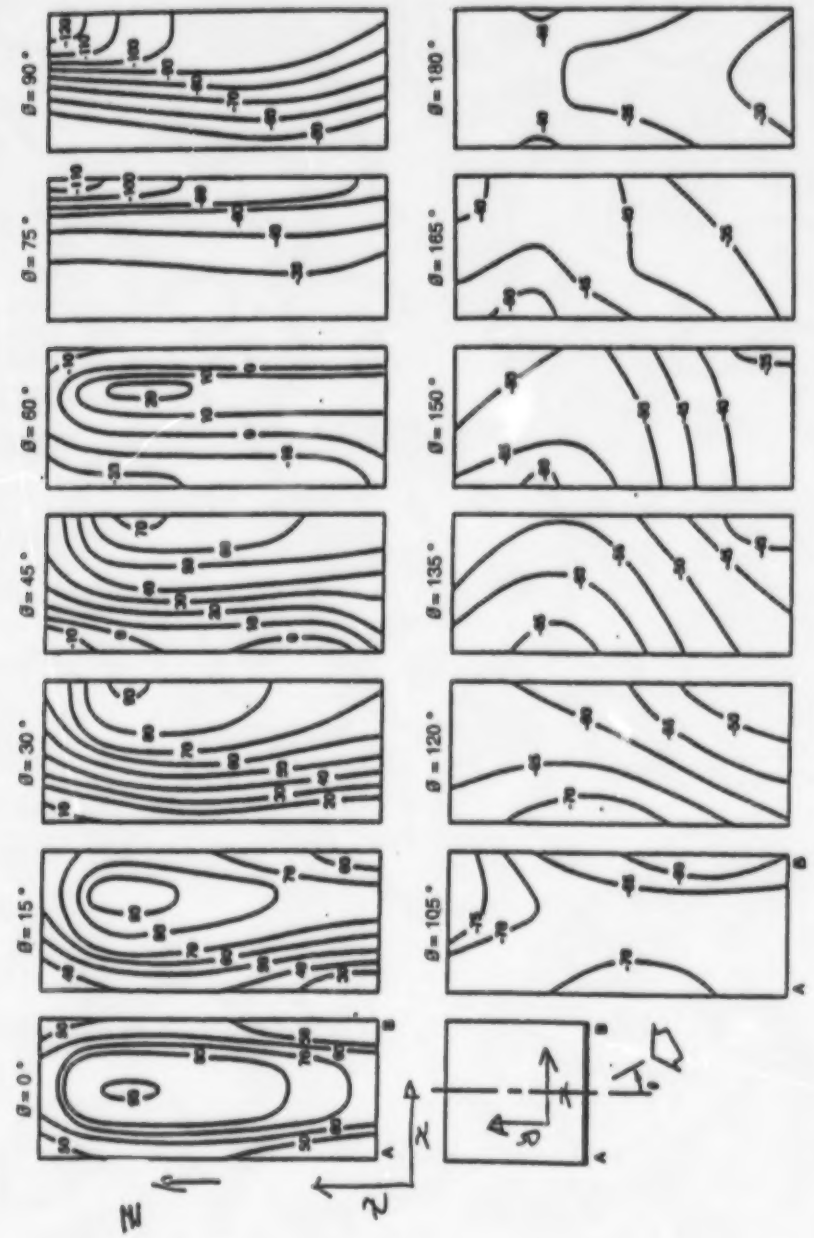


Figure 3.8 : Gradients de pression moyens sur un bâtiment de grande hauteur [39]

La différence de pression entre deux orifices peut aussi être décrite de façon générale par le coefficient Cp,v, où l'indice v désigne la ventilation.

$$C_{p,v} = \frac{\Delta P_{ventilation}}{P_{stagnation}}$$

où $\Delta P_{ventilation}$ est la différence de pression disponible pour établir la ventilation.

L'usage de coefficients de pression permet d'appliquer des données, recueillies à une vitesse du vent, à différentes conditions des vitesses du vent. Les données sur le vent, comme celles publiées par le Service de l'environnement atmosphérique [40], fournissent la vitesse moyenne horaire du vent comme fonction de l'orientation et du moment de l'année. Pour de nombreux emplacements au Canada, cette vitesse moyenne horaire se situe normalement entre 10 et 25 kilomètres heure. Cela se traduit par des pressions de stagnation oscillant entre 5 et 30 pascals, à 10 mètres au-dessus du niveau du sol.

L'annexe C contient un résumé des données pour Waterloo (Ontario), provenant du Service de l'environnement atmosphérique (SEA). Étant donné des coefficients approximatifs de pression de ventilation, on peut utiliser des données semblables à celles-ci, disponibles pour tout le Canada et fournies par le SEA, pour prédire les forces motrices de ventilation.

3.2.1 Relevés sur place

Pour calculer les coefficients réels de pression de ventilation, on a entrepris des mesures sur place du vent ainsi que des pressions du vent sur un immeuble réel.

Voici les principales variables influant sur les pressions de ventilation exercées sur un bâtiment :

1) les dimensions et le facteur de forme de l'immeuble;
2) la vitesse du vent;
3) la direction du vent; et
4) l'emplacement des orifices, sur l'immeuble et les uns par rapport aux autres.

Le programme de relevés sur place conçu quantifiera les trois dernières variables. Il a été très difficile, par le passé, de mesurer les pressions de ventilation sur place, car celles-ci sont petites et variables. Les progrès réalisés en technologie de mesure des pressions ont supprimé certaines de ces difficultés.

Les relevés ont été effectués sur le mur ouest de l'installation d'essai Beghut, pendant la période de novembre à décembre 1994. Le Beghut est une installation grandeur nature d'exposition et d'essai, aménagée sur le campus de l'University of Waterloo. La figure 3.9 présente un résumé des cinq configurations d'orifice (portant les numéros 1 à 5), mesurées en détail, les dimensions de la maison d'essai, ainsi que les emplacements des prises de pression (portant les lettres A à F).

La vitesse et la direction du vent, la pression de stagnation absolue au point A, ainsi que la différence de pression entre le point A et le point d'intérêt (prises de pression B à F), ont été

mesurées à chaque seconde. Toutes les 15 minutes, on a calculé les écarts moyens et standard, et classé le relevé selon la vitesse et la direction du vent, tel qu'indiqué au tableau 3.2, puis sauvegardé les résultats sur disquette. Chacune des cinq configurations d'orifice indiquées à la figure 3.9 a été conservée durant au moins une semaine. Après environ six semaines, on a recueilli approximativement 3 500 inscriptions.

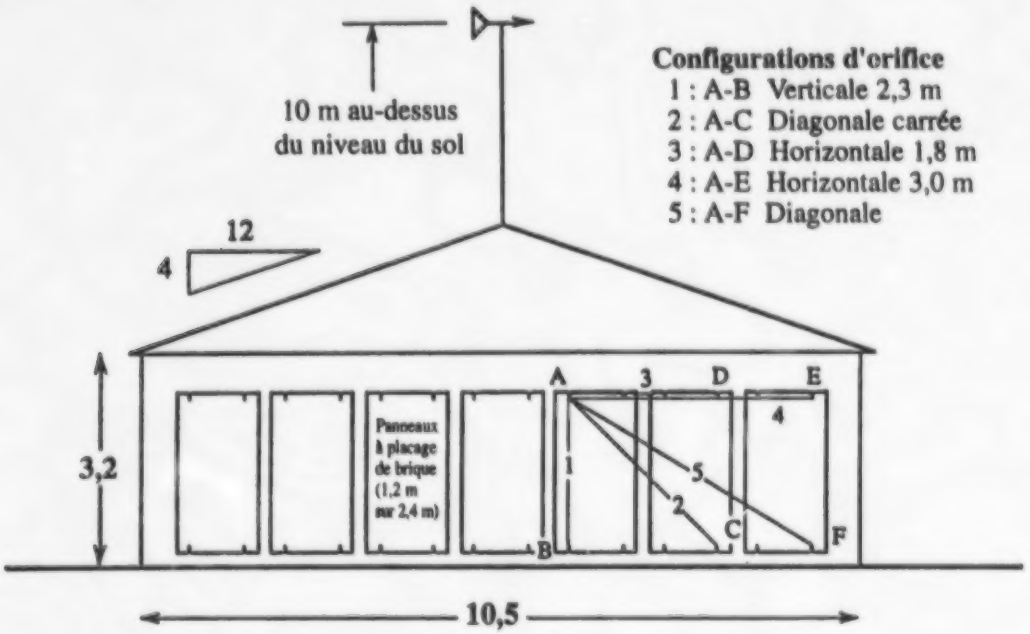


Figure 3.9 : Montage pour les relevés sur place des pressions de ventilation

Une présentation de tous les résultats et une analyse complète des renseignements recueillis dépasseraient l'envergure du présent rapport, mais on trouvera ci-après quelques résultats menant à d'importantes conclusions pour la ventilation.

Un exemple de relevé provenant de ces opérations sur place est présenté à la figure 3.10. Ces pressions ont été enregistrées pour la configuration d'orifice nº 1, où le vent venait de 30 ° au sud par rapport à plein ouest, à une vitesse moyenne de 4,0 m/s (près de la vitesse moyenne annuelle du vent), à 10 m. Les caractéristiques suivantes, applicables à de nombreux relevés, doivent être notées :

- comme on le sait généralement, la vitesse, la direction et les pressions du vent présentent toutes de grandes variations à court terme, par rapport à la valeur moyenne;
- la vitesse du vent entraîne des pressions de stagnation relativement faibles aux points A et B (normalement entre 0 et 12 Pa);
- les pressions exercées aux points A et B sont différentes (il y a un gradient de pression entre A et B), et cette pression est disponible pour entraîner une ventilation.

Pour cette configuration particulière basée sur la direction du vent et la ventilation :

- La différence de pression entre les points A et B, la pression disponible pour entraîner une ventilation, est ici d'environ 1/5 de la pression totale en A. Aux fins de ventilation, il s'agit d'une force relativement importante.
- Les pressions exercées en A et B sont relativement bien corrélées; lorsque la pression en A augmente, celle en B fait de même, de sorte que le rapport entre la pression de ventilation (A-B) et la pression totale (A) est aussi relativement constant.

Même si les pressions de stagnation en A et les pressions de ventilation varient d'un relevé à l'autre, on peut enlever le dimensionnement des valeurs en calculant les coefficients de pression de ventilation, c'est-à-dire, le rapport entre la pression de ventilation A-B et la pression de stagnation calculée du vent. Ces coefficients de pression de ventilation, applicables à chaque relevé, ont été calculés au moyen de la pression moyenne de stagnation à la hauteur des avant-toits du Beghut (3,2 m au-dessus du niveau du sol), à l'emplacement typique de référence pour les bâtiments de faible hauteur avec toit en pente, et la pression moyenne mesurée de ventilation :

$$C_{p,v} = \frac{\Delta P_{ventilation}}{P_{stagnation}}$$

où $P_{stagnation}$ est la pression moyenne de stagnation à la hauteur des avant-toits du Beghut, et

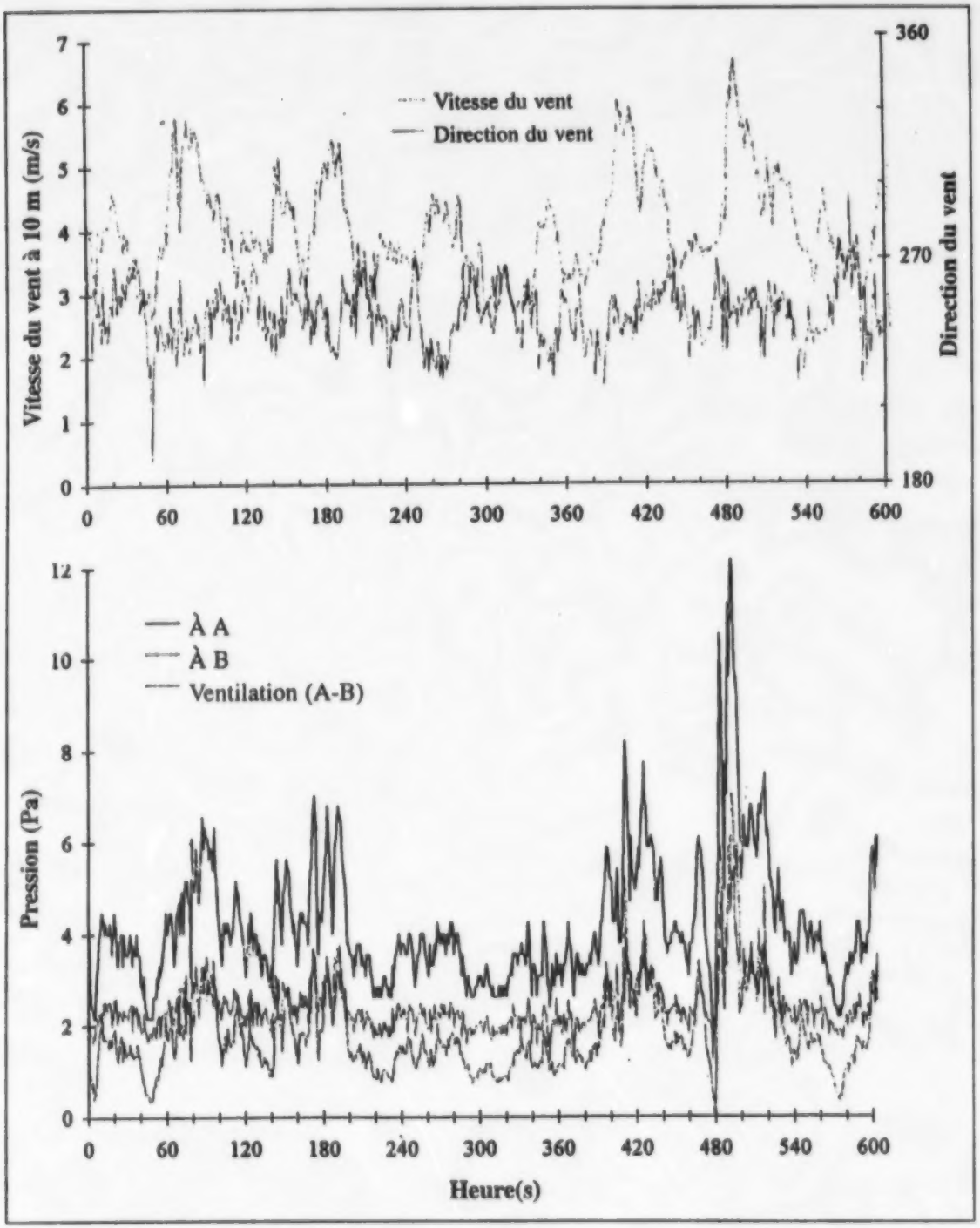
$\Delta P_{ventilation}$ est la pression de ventilation moyenne mesurée.

L'influence de la configuration des orifices et de la direction du vent peut être examinée au moyen des coefficients moyens de ventilation calculés pour les nombreux relevés faits pendant le contrôle sur place.

3.2.2 Gradients spatiaux moyens

Les gradients de pression du vent, à la surface d'un bâtiment, varient selon l'espace et le temps. Seuls les gradients moyens de pression spatiale (P_{moy} à la figure 3.5), à la surface du bâtiment, sont examinés ci-après, bien que les gradients dynamiques de courte durée (P_{inst} à la figure 3.5), appelés spatio-temporels dans la documentation, puissent aussi être importants pour la ventilation et soient examinés à la section 3.2.3.

La figure 3.11 résume les valeurs moyennes du coefficient de pression de ventilation, à partir des relevés sur place concernant chacune des configurations indiquées à la figure 3.9, pour toutes les directions et vitesses du vent et pour chaque direction du vent. La valeur du coefficient de ventilation moyen se base sur 10 à 150 relevés pour cette direction. Le coefficient de ventilation moyen (basé sur 421 à 1 047 relevés) pour toutes les directions du vent et pour chaque configuration d'orifice, est indiqué dans le premier diagramme à barres de la figure 3.11. Les cinq autres illustrations présentent les coefficients de ventilation moyens pour chaque direction du vent et pour chacune des cinq configurations d'orifice. L'annexe C contient des statistiques sommaires et des illustrations de fréquence relative pour chaque configuration d'orifice.



Note : Vent de la direction ouest-sud-ouest, configuration d'orifice nº 1, vitesse moyenne du vent de 4,0 m/s.

Figure 3.10 : Exemple de relevé sur la pression de ventilation, la pression de stagnation et la vitesse du vent

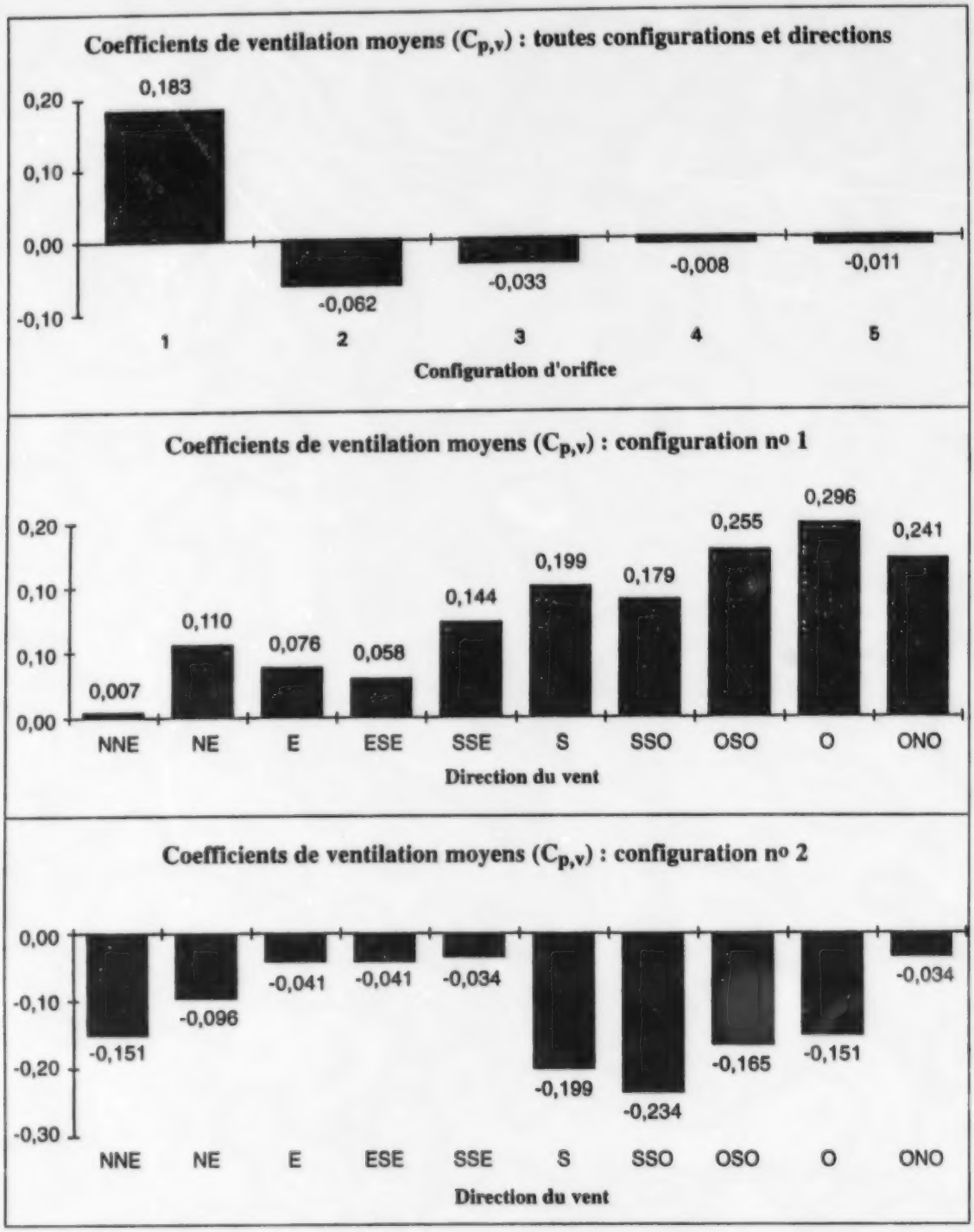


Figure 3.11a : Coefficients de ventilation moyens (moyenne, configurations nos 1 et 2)

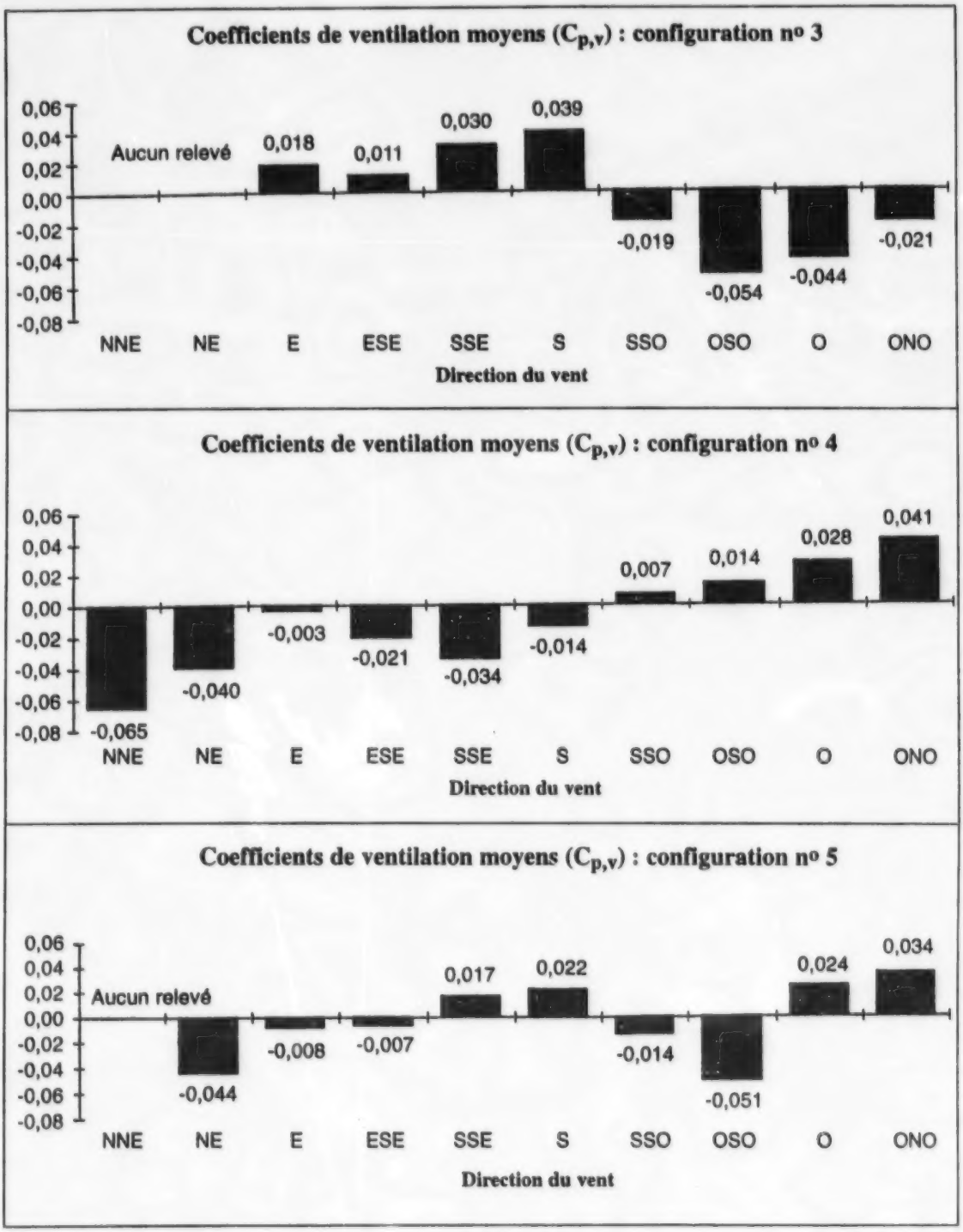


Figure 3.11b : Coefficients de ventilation moyens (configuration nos 3, 4 et 5)

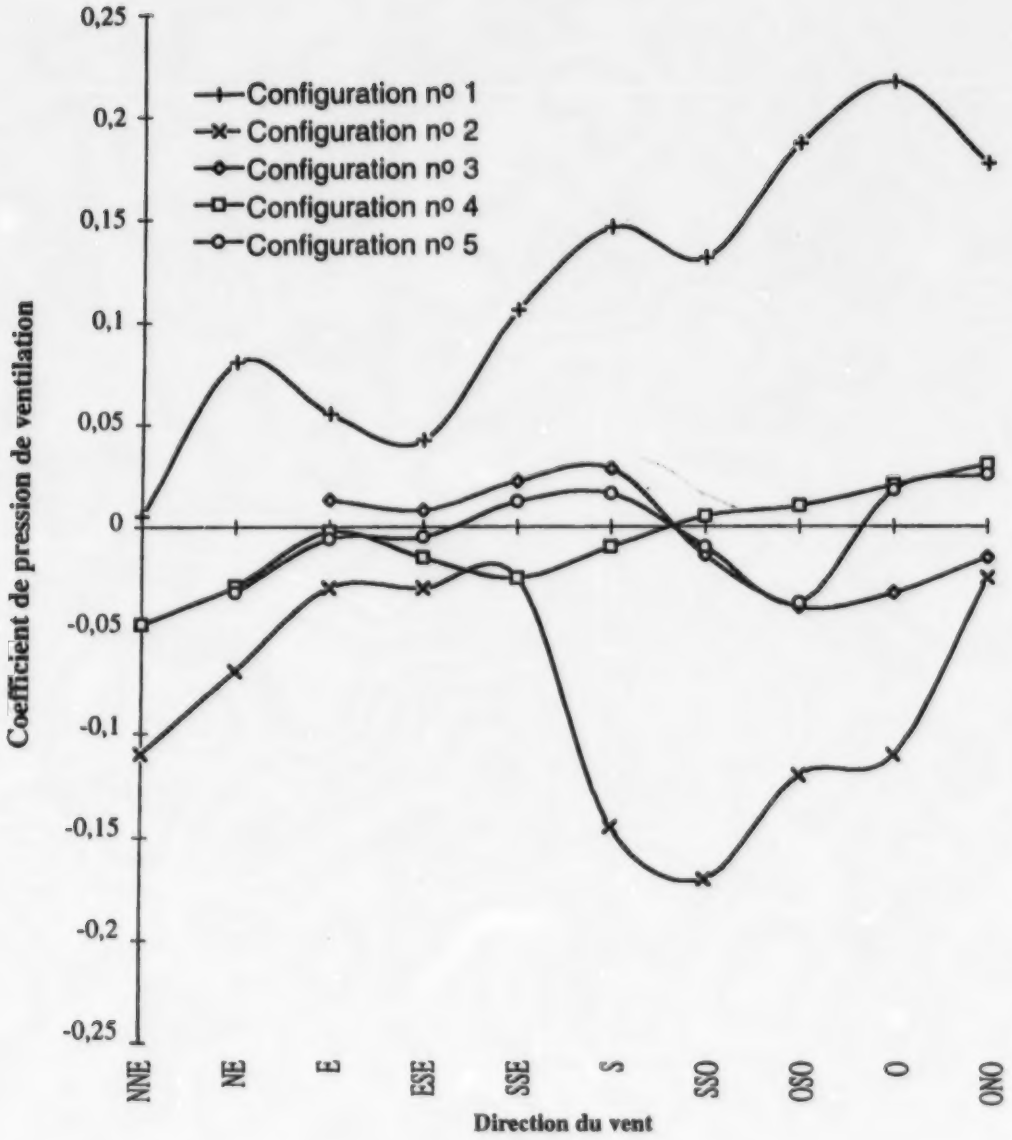


Figure 3.11c : Coefficients de ventilation moyens (toutes directions et configurations)

On peut tirer plusieurs conclusions importantes de ces résultats. La configuration d'orifice n° 1 (deux orifices séparés à la verticale par une distance de 2,4 m) avait de loin le plus gros coefficient de ventilation moyen (0,18) et était la seule configuration où les pressions de ventilation étaient toujours exercées dans une direction, quelle que soit la direction du vent. Ces résultats justifient la croyance commune selon laquelle il est préférable de placer des orifices en haut et en bas de la cavité, si l'on souhaite favoriser la ventilation.

Les pressions de ventilation applicables à la plupart des configurations de ventilation étaient supérieures pour un vent soufflant directement sur le mur (ouest), mais pouvaient néanmoins être importantes lorsque le vent provenait de l'autre direction (de l'est). Par conséquent, le débit de ventilation peut se produire même du côté sous le vent d'un bâtiment.

En tenant compte du pourcentage de temps durant lequel le vent souffle d'une certaine direction, et de la moyenne annuelle de la vitesse du vent soufflant de cette direction, on peut calculer les pressions annuelles moyennes de ventilation pour les murs d'essai du Beghut. La figure 3.12 illustre le *potentiel* de ventilation pour chaque direction, et pour les différentes configurations. On a calculé le potentiel sous forme du produit du coefficient de ventilation, de la vitesse moyenne du vent ainsi que du nombre d'heures par année pendant lesquelles le vent souffle de cette direction. Le potentiel est exprimé en unités de pascals-heures par année et est valide pour Waterloo (Ontario), ainsi que pour les configurations d'orifice testées sur le Beghut.

La figure 3.12 montre clairement que certaines directions et certaines parties d'un mur recevront une ventilation plusieurs centaines de fois plus intense que d'autres, et que l'emplacement des orifices sur le mur peut avoir une influence presque aussi grande. À Waterloo, le vent souffle surtout de l'ouest, de sorte que les murs exposés à cette direction reçoivent la plus forte ventilation. Souvent, la direction prédominante du vent apporte aussi la plus forte humidification par les rafales de pluie. Cependant, le côté sous le vent d'un bâtiment présente généralement la plus forte condensation par exfiltration.

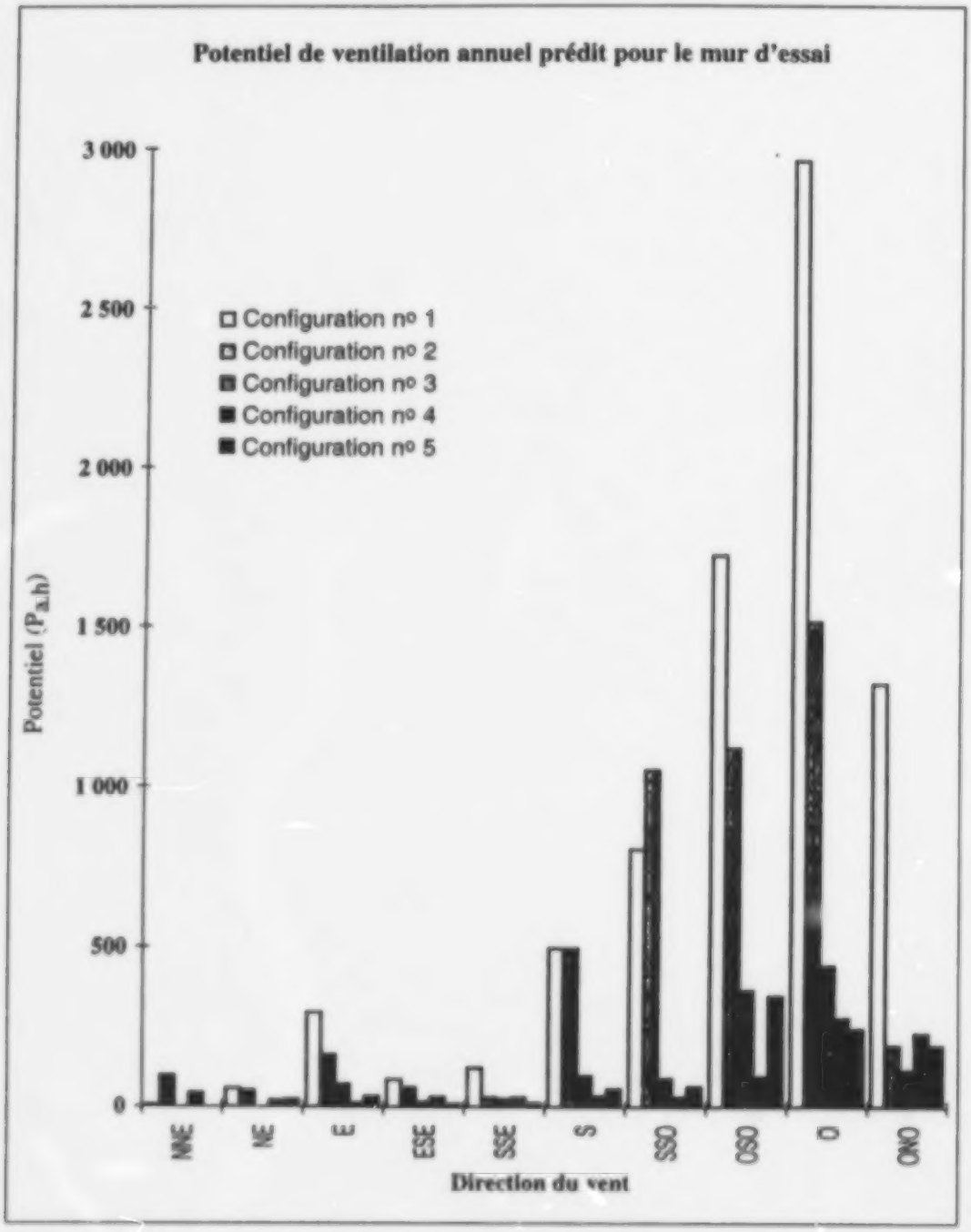


Figure 3.12 : Potentiel de ventilation pour un mur d'essai

3.2.3 Variations spatiales dynamiques

Des rafales de courte durée (c'est-à-dire, de moins de 3 à 5 secondes, environ) peuvent se produire sur de petites surfaces d'un bâtiment et créer des gradients de pression temporaires, mais élevés. Personne n'a encore tenté de quantifier l'influence de ces variations sur la ventilation, mais on peut faire certains commentaires et observations pertinents.

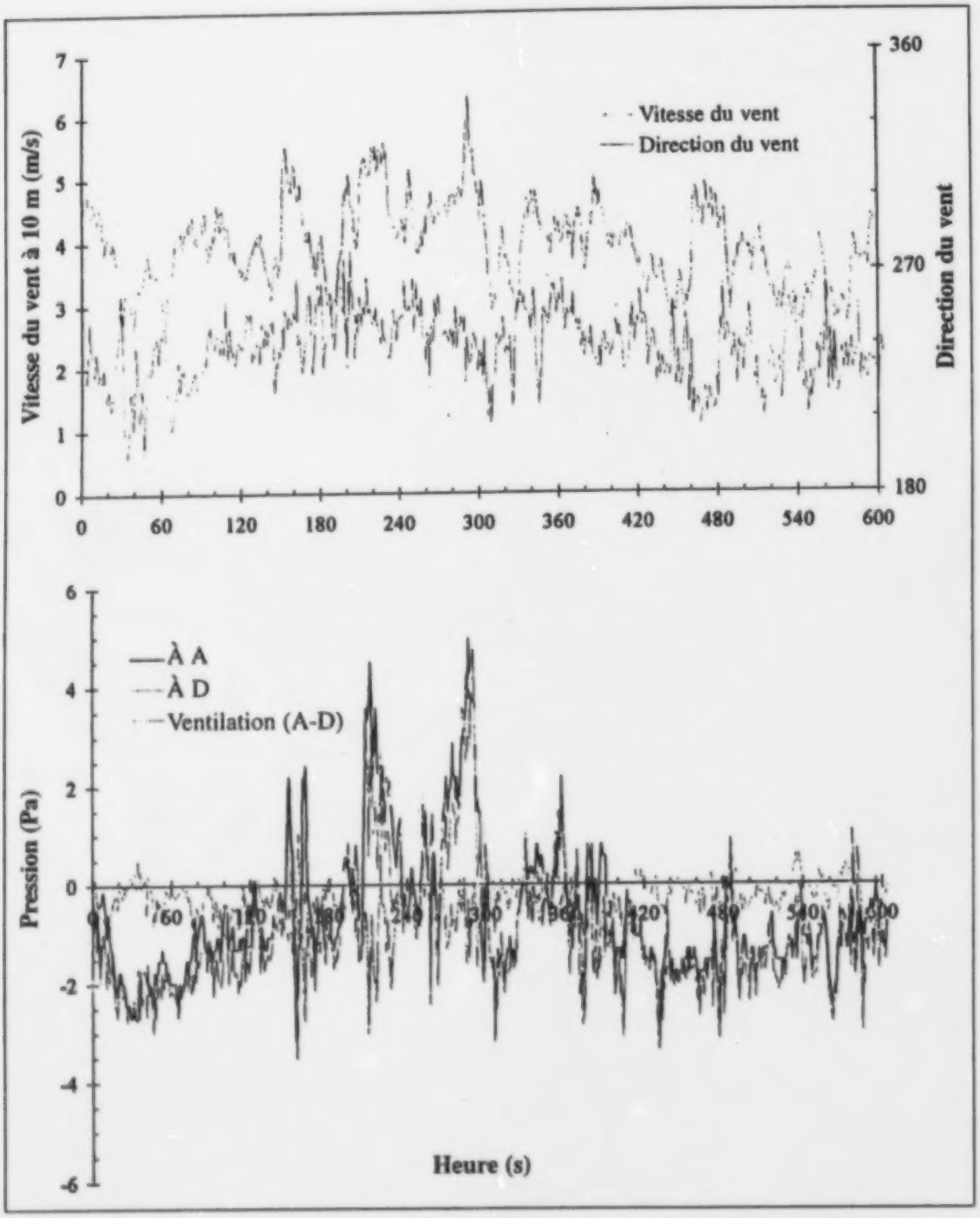
La figure 3.13 illustre les mesures du vent et de la pression pour la configuration d'orifice n° 3. La vitesse et la direction du vent sont très semblables au relevé présenté à la figure 3.10. Notez cependant l'importante différence de pression mesurée à la surface du bâtiment; les pressions sont plus variables et moins bien corrélées. Les pressions en A et D sont souvent presque les mêmes, mais les variations spatiales dynamiques à court terme provoquées par les différences de pression sont répandues. Bien que la pression de ventilation moyenne soit de –0,34, la figure 3.13 montre qu'elle est aussi parfois positive.

Une approche de l'évaluation de l'influence des variations spatiales dynamiques consiste à utiliser des mesures statistiques de la variabilité des pressions de ventilation. Par exemple, même si le plus petit coefficient de ventilation applicable à la configuration d'orifice nº 1 ($C_{p,v}$ = 0,007 pour un vent provenant du NNE) suggère une faible ventilation, l'écart type moyen des pressions d'orifice pour cette catégorie de direction était de 0,5 Pa. Cela montre que la direction du débit changeait constamment, mais exerçait quand même une ventilation sur le mur. Par conséquent, la valeur moyenne est trompeuse, et l'écart standard fournit une meilleure mesure du potentiel de ventilation probable.

Comme autre exemple, examinons les coefficients de ventilation sur toutes les directions du vent pour la configuration d'orifice nº 5. Même si ces coefficients sont très petits (de l'ordre de 2 à 3 %) et si la pression de ventilation moyenne mesurée n'était que de –0,27 Pa, l'écart type moyen était de 1,82 pascal (voir annexe C). Cette forte variabilité est susceptible d'imposer un important mouvement de l'air à travers la cavité. En fait, l'écart type élevé exerce, sur le débit de ventilation, un effet probablement tout aussi important qu'une différence de pression moyenne de 1 Pa.

L'envergure spatiale des rafales est directement liée à la longueur d'onde du vent (c'est-à-dire, vitesse ÷ fréquence) et à la turbulence [41]. À mesure que la longueur d'onde augmente, la force de la rafale fait de même. Pour une vitesse donnée, lorsque la fréquence augmente (c'est-à-dire, lorsque la durée des rafales diminue), la force des rafales baisse. Pour une fréquence donnée, à mesure que la vitesse augmente, l'envergure spatiale de la rafale fait de même. Lorsque la turbulence augmente, la force des rafales diminue.

Dans une analyse très simple, il est possible de postuler une « force de rafale » à partir des renseignements statistiques recueillis grâce aux mesures du vent. Une suggestion est qu'une force typique de rafale du vent sera de l'ordre de 1/5 à 1/8 de la longueur d'onde et un peu plus petite dans les régions plus turbulentes, sur les surfaces des bâtiments [42]. Pour une vitesse de 10 m/s (un vent fort) et une durée de rafale de trois secondes, une force typique de rafale serait de : (1/8 à 1/5) • 10 ÷ (1/3) = 4 à 6 m. Pour un vent de 4 m/s (une vitesse moyenne), la même rafale de



Note : Vent provenant de l'ouest-sud-ouest, configuration d'orifice n° 3, vitesse moyenne du vent de 3,8 m/s.

Figure 3.13 : Exempie de relevé sur la pression de ventilation, la pression de stagnation et la vitesse du vent

trois secondes aurait une force de 1,5 à 2,4 m. Pour une rafale durant une seconde dans des conditions similaires de vitesse de vent, la force de la rafale serait respectivement de 1,25 à 2,0 et de 0,5 à 0,8 m. Par conséquent, on peut prévoir avec réalisme que les courtes rafales ne viseront que quelques-uns des nombreux orifices dans un système mural bien ventilé. Près des arêtes des bâtiments ou des géométries compliquées, la turbulence sera importante et les forces des rafales, relativement petites.

Si les rafales sont assez fortes pour envelopper simultanément tous les orifices reliés à une cavité, aucune ventilation ne se produira car la pression exercée sur tous les orifices sera la même. Toutefois, une rafale de courte durée exercée sur un seul orifice forcera l'air à pénétrer dans la cavité de l'orifice en question. Même si cela peut ne se produire que durant peu de temps, la circulation d'air peut être importante dans la cavité. Pour les murs dotés d'un seul orifice, la compression de l'air par les variations de pression temporelles est si faible que l'on peut s'attendre à peu de mélange (voir 3.3.4).

Le débit de ventilation à travers les fenêtres est quelque peu semblable à celui des cavités d'un bâtiment, car les écarts de pression spatio-temporels sont à l'origine de la ventilation. Même si c'est difficile à prévoir, certaines recherches dans ce sens [43, 44] ont montré qu'à lui seul, ce mécanisme peut entraîner une importante ventilation.

3.2.4 Pompage par le vent

Une cavité dotée d'un seul orifice peut, dans une certaine mesure, être « ventilée » par des pressions du vent de manière semblable au pompage thermique. Les pressions changeantes du vent, exercées à l'emplacement de l'orifice, comprimeront et décomprimeront le volume d'air dans la cavité. Par conséquent, un faible volume ou une faible masse d'air sortira de la cavité ou y entrera. En quelques heures ou jours, le volume d'air déplacé s'accumulera. Toutefois, seul l'air placé près de l'orifice proprement dit est échangé. L'air possède une très faible résistance à la diffusion de la vapeur, et l'humidité se trouvant dans la cavité ailleurs que dans l'orifice peut se déplacer rapidement vers celui-ci par diffusion et convection (provoquées à la fois par des différences thermiques et de vapeur dans tout le volume de la cavité) dans la cavité.

Le changement de volume attribuable à la compressibilité (c'est-à-dire, le volume d'échange d'air causé par le pompage), en raison d'une augmentation de la pression extérieure, peut être calculé à partir de la loi de Charles comme suit :

$$\Delta V_{pompage} = \frac{\Delta P}{P_{abs}} * V_{cavité}$$

où $V_{cavité}$ est le volume d'air de la cavité,

ΔP est le changement de pression,

P_{abs} est la pression atmosphérique absolue (le plus souvent, vers 101 300 Pa).

La relation ci-dessus se base sur l'hypothèse selon laquelle le volume de la cavité ne change pas. Des cavités souples (p. ex., celles ayant des membranes non adhérentes comme pare-air) permettent le mouvement d'un plus gros volume d'air.

La figure 3.14 illustre le débit de ventilation sous forme de fonction du débit de rafale. À partir des pressions mesurées illustrées aux figures 3.10 et 3.13, on peut voir que le débit de rafale est nettement inférieur à 100 Pa.s le plus souvent. Pour des débits de rafale inférieurs à 100 Pa.s, le débit de ventilation est très faible, moins d'environ 0,1 litre par seconde, et, en moyenne, le taux de ventilation par pompage est susceptible d'être inférieur à 0,01 litre par seconde. Ces résultats ont deux conséquences.

D'abord, il se produit un transfert d'air relativement faible à cause du pompage; ce n'est pas un moyen de ventilation très efficace. À moins que la cavité n'ait une paroi souple (ce qui nuit beaucoup à la performance de la modération de pression), le débit de ventilation sera vraisemblablement peu avantageux.

En second lieu, il faut tenir compte de la modération de pression sur la surface de l'écran. Le débit d'air nécessaire pour modérer un pourcentage important des pressions exercées sur l'écran est très faible. Des débits de 0,1 l/s sont facilement atteints pour la plupart des orifices muraux avec très peu de restriction et, par conséquent, de chute de pression (p. ex., la chute de pression effectuée sur un joint vertical ouvert sera inférieure à 0,1 pascal). Des taux supérieurs de rafale comme de 500 à 1 000 Pa.s, qui peuvent se produire durant quelques secondes pendant chaque tempête, n'exigeront néanmoins que des débits inférieurs à un litre par seconde pour équilibrer les pressions. Ces débits à travers un joint vertical ouvert produisent une chute de pression d'environ 3 Pa, c'est-à-dire seulement 0,3 % du débit de rafale appliqué pour la pression! Par conséquent, si la compressibilité de l'air était le facteur limitatif, les différences de pression auxquelles un mur EMP est exposé pourraient être bien modérées, pratiquement équilibrées, par de petits débits d'air à travers des orifices aux surfaces relativement faibles. Le degré de modération de pression est généralement contrôlé par l'envergure des variations spatiales de pression, et non par la surface de ventilation. Malheureusement, cela signifie que l'on peut augmenter le niveau de modération de pression en accroissant la compartimentation (une solution coûteuse), plutôt que d'augmenter simplement la surface de ventilation (solution relativement économique).

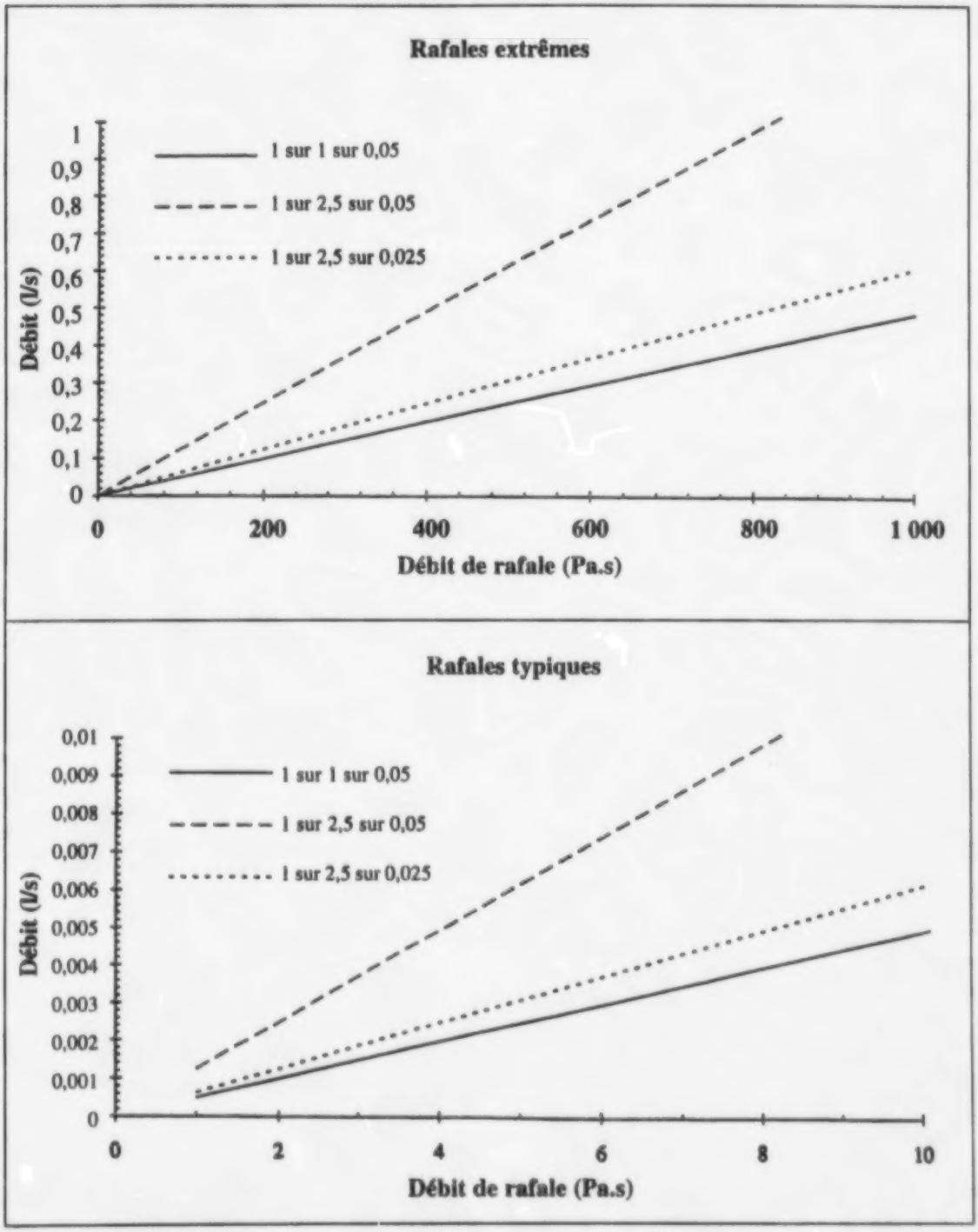


Figure 3.14 : Débit d'air en fonction de la vitesse du vent dans les rafales

3.3 Autres forces

D'autres forces que la poussée thermique et le vent peuvent provoquer un écoulement d'air de ventilation. Les plus importantes sont la poussée de l'humidité et les fuites d'air.

3.3.1 Pressions intérieures

Si l'intérieur d'un bâtiment est pressurisé ou dépressurisé par l'effet cheminée, la ventilation mécanique, le vent ou une combinaison de ces forces, un pare-air défectueux peut laisser entrer un important volume d'air à travers l'enveloppe. Cependant, l'air intérieur aura un effet asséchant seulement dans les bâtiments climatisés en été. En hiver, on peut s'attendre à de la condensation.

Il est difficile de quantifier la nature d'un pare-air mal construit et d'évaluer les effets de pression intérieure au bâtiment. Pour un immeuble de 10 à 15 étages, les pressions combinées exercées sur la surface de l'enveloppe peuvent être de l'ordre de 10 à 100 Pa [45]. Le pare-air dans les structures résidentielles de grande hauteur peut permettre le passage, à travers l'enveloppe, de débits d'air allant de 0,5 à 10 l/s/m^2, à une pression de 50 Pa [46], et cet air doit traverser la cavité et sortir par les orifices. Ainsi, on peut voir qu'un pare-air poreux peut entraîner la déperdition d'un important volume d'air à travers la cavité. Étant donné que l'air intérieur est climatisé (et exige donc de l'énergie pour être remplacé) et peut contenir de l'humidité, un tel débit massique doit être considéré comme un grand potentiel de charge d'humidité sur le mur.

Même si la différence de teneur en humidité entre l'air extérieur et l'air climatisé est presque aussi forte en été qu'en hiver, les différences de pression exercées à travers l'enveloppe ont tendance à être nettement plus faibles en été qu'en hiver. Par conséquent, le potentiel de condensation hivernale est habituellement beaucoup plus prononcé que l'évaporation estivale. La nature du débit de fuites d'air est également très différente du débit de ventilation, qui tend à se distribuer sur de grandes surfaces. En général, les fuites d'air se concentrent sur les déchirures, les perforations et d'autres défauts dans l'enveloppe du bâtiment. Bien que la condensation puisse s'accumuler sous forme de givre le long des voies de fuite, le drainage du condensat distribuera l'humidité sur de plus grandes surfaces de l'enveloppe. En été, l'exfiltration le long des mêmes voies ne peut sécher que les surfaces balayées par le débit d'air, et non les autres pièces de l'ensemble pouvant avoir été humidifiées en hiver. Pour cela, et pour d'autres raisons plus techniques (l'hystérésis d'isothermes de sorption et la nature du transfert énergétique pendant l'évaporation et la condensation), l'évaporation par exfiltration sera un mécanisme de transfert d'humidité moins, et parfois beaucoup moins efficace que la condensation par exfiltration. Pour des volumes très faibles de fuites d'air, un assèchement peut se produire, mais il ne sera pas aussi prononcé que l'humidification, dans des conditions adverses de température et de différences de pression de vapeur.

3.3.2 Poussée de l'humidité

Tel que décrit à la section 3.1, la température influe sur la densité de l'air. La teneur en humidité de l'air exerce également une légère modification. L'air, mélangé à de la vapeur d'eau, a une plus faible densité que l'air sec. En employant les relations de la loi des gaz parfaits [29], on peut calculer comme suit la masse de l'air :

$$w_a = \frac{p_w V}{R_a T}$$

et la densité de la vapeur d'eau, comme suit :

$$w_w = \frac{p_w V}{R_{wv} T}$$

où

w_a et w_w sont respectivement la masse de l'air sec et de la vapeur d'eau (kg);

p_a et p_w sont les pressions partielles de l'air sec et de la vapeur d'eau (Pa);

V est le volume d'air humide (m^3), et

R_a et R_{wv} sont les constantes des gaz pour l'air (287,1 J/kg • K) et de la vapeur d'eau (461,5 J/kg • K).

La différence de densité entre deux masses d'air à la même température, mais dont la teneur en humidité est différente, peut provoquer un débit d'air par convection dans la cavité. Une telle convection est utile, car l'humidité est alors bien distribuée et mélangée avec l'air dans la cavité.

La différence des teneurs en humidité entre la cavité et l'extérieur entraîne des forces de poussée qui font circuler l'air de la même façon que dans le cas de la poussée thermique (figure 3.5). Le tableau 3.2 contient les résultats des calculs portant sur la différence de pression générée par la poussée d'humidité seule dans des cavités murales de différentes hauteur, avec une paroi interne saturée (c'est-à-dire d'un RH de 100 %), comme fonction de la différence de température d'air et de l'humidité relative extérieure. Pour plus de commodité, on a supposé une température de 10 °C pour la façade intérieure de la cavité. Dans les cas où la température extérieure serait de 3 °C plus fraîche que dans une cavité de 2,4 m de hauteur, une pression motrice d'environ 0,3 à 0,4 Pa serait générée pour des humidités relatives extérieures typiques situées entre 50 et 85 %. Si l'air extérieur est de 30 °C plus frais (p. ex., une journée fraîche, mais ensoleillée), des pressions de 3,6 Pa seraient générées, même avec une humidité extérieure de 85 %.

Une comparaison de ces résultats avec ceux de la poussée thermique, au tableau 3.1, montre que la poussée de l'humidité peut être une force motrice de ventilation aussi importante. Bien que la poussée thermique se manifeste chaque fois que la température de la cavité est supérieure à la température ambiante, la poussée de l'humidité ne se produit que lorsque l'air de la cavité est plus humide que l'air ambiant, c'est-à-dire, quand la cavité est humide et la vapeur d'eau se mêle à l'air de la cavité. Par une calme journée ensoleillée au printemps ou à l'automne, un mur avec

écran ou paroi interne humide peut souvent être soumis à des pressions combinées (thermique et d'humidité) supérieures à 5 Pa. Les pressions de la poussée d'humidité augmenteront régulièrement à mesure que la paroi intérieure ou l'écran séchera, et augmenteront nettement sous le chauffage solaire. Naturellement, à mesure que les taux d'évaporation augmentent, la température de la surface de séchage diminue à cause de l'énergie de l'évaporation.

Pour une température de cavité de 10 °C	*Écart de température (cavité-extérieur)*					
	ΔT = 3 °C RH extérieur		ΔT = 10 °C RH extérieur		ΔT = 30 °C RH extérieur	
Hauteur de cavité (m)	50 % ΔP (Pa)	85 % ΔP (Pa)	50 % ΔP (Pa)	85 % ΔP (Pa)	50 % ΔP (Pa)	85 % ΔP (Pa)
2,4	0,39	0,35	1,17	1,15	3,60	3,60
3,0	0,49	0,44	1,47	1,44	4,50	4,50
3,6	0,59	0,53	1,76	1,72	5,41	5,40
4,8	0,79	0,71	2,35	2,30	7,21	7,20
6,0	0,98	0,89	2,93	2,87	9,01	9,00

Tableau 3.2 : Pressions de ventilation calculées attribuables à la poussée de l'humidité

4. Mécanique du débit de la ventilation

Dans ce chapitre, la théorie de base de la mécanique du débit est appliquée à la circulation de l'air à travers les orifices et cavités. Le chapitre précédent exposait les forces motrices potentielles et leur envergure (en pascals). Ce chapitre porte sur la résistance au débit de ventilation (la friction sous diverses formes), sous forme de pertes de pression (en pascals). Un système de débit de ventilation équilibre les forces motrices et les forces résistantes.

La figure 4.1 présente une simplification de la mécanique du débit de ventilation à travers une cavité murale (verticale ou horizontale). La résistance au débit à partir des points A à B et C à D est attribuable aux orifices. À partir des points B à C, la résistance au débit est attribuable à la friction dans les murs à cavité.

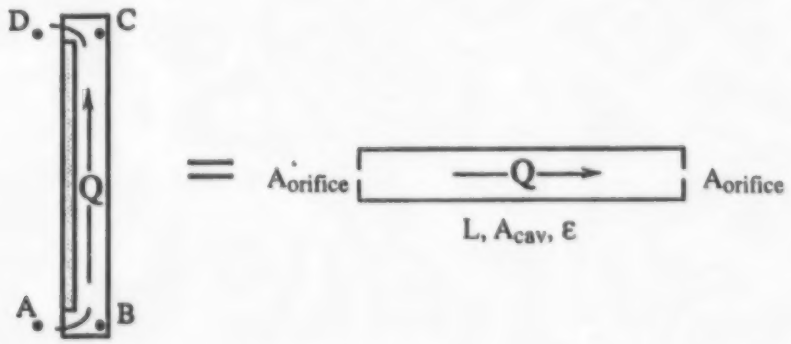


Figure 4.1 : Modèle de résistance d'une cavité à la circulation de l'air

On peut voir que le débit de ventilation est analogue à la circulation de l'air par un orifice jusqu'à une conduite rectangulaire, puis à la sortie par un orifice. On prédit la résistance à la circulation de l'air dans ce modèle simplifié, en examinant d'abord le débit à travers la cavité, puis celui à travers les orifices.

4.1 Débit d'air dans les cavités

La résistance à la circulation de l'air dans la cavité (entre les points B et C de la figure 4.1) dépend théoriquement de trois caractéristiques :

1. la vitesse d'écoulement;
2. les aspérités des parois;
3. les dimensions (la profondeur) et la forme de la cavité.

En pratique, une quatrième caractéristique (le nombre et les dimensions des obstructions ainsi que le nombre de déflecteurs) peut être importante. Étant donné que cette caractéristique dépend le plus souvent de l'exécution professionnelle, elle est difficile à quantifier, mais nous en parlons ci-après.

La friction varie beaucoup avec la vitesse; la friction dépend du caractère laminaire ou turbulent du débit. Dans un débit laminaire, le cisaillement entre les particules assure une bonne circulation de l'air. Dans un débit turbulent, l'inertie des particules d'air individuelles dépasse le cisaillement entre elles. Pour les débits internes (là où l'air est confiné de tous les côtés), la transition entre le débit laminaire et turbulent se produit lorsque le nombre de Reynolds se situe entre 2 000 et 3 000. Ce nombre est une mesure adimensionnelle du rapport entre les forces de viscosité et d'inertie. Dans des conditions d'air standard, le nombre de Reynolds peut être calculé à partir de l'équation suivante [29] :

$$Re = 66\,400 \cdot D_h \cdot V$$

où Re est le nombre de Reynolds, D_h est le diamètre hydraulique (ou équivalent) et V est la vitesse d'écoulement.

Le diamètre hydraulique d'une cavité peut se définir par l'équation suivante :

$$D_h = \frac{4 \cdot A}{P}$$

où $A = b \cdot d$ est l'aire de la section transversale et $P = 2 \cdot d$ est le périmètre d'une cavité de largeur b et d'une profondeur d. Par conséquent, pour une cavité, le diamètre hydraulique se calcule comme suit :

$$D_h = 4\ b \cdot d \div 2\ b = 2\ d$$

La figure 4.2 illustre le débit à travers des cavités et des orifices, par opposition au nombre de Reynolds, et indique les régions où la vitesse d'écoulement ou le débit est laminaire ou turbulent, selon le cas. Cette illustration montre que l'on peut normalement présumer que la circulation est laminaire, d'après les vitesses typiques prévues dans la ventilation de la cavité. Dans un écoulement laminaire, la chute de pression exercée sur la cavité variera de manière linéaire avec la vitesse. Si le débit augmente suffisamment, il devient turbulent et la friction augmente alors plus rapidement que lui. Cette situation a l'avantage de limiter naturellement les débits de ventilation à des vitesses moins susceptibles d'entraîner la pénétration d'eau dans la cavité.

On utilise souvent l'équation Darcy-Weisbach [23] pour calculer la chute de pression attribuable à la friction dans l'écoulement fluide, à travers les tuyaux, et la circulation de l'air dans des conduites :

$$\Delta P_{tuyau} = f \cdot (L/D_h) \cdot P_v$$

où f est le facteur de friction (tenant compte de la vitesse d'écoulement et des aspérités du tuyau),

L est la longueur du tuyau, D_h est le diamètre hydraulique, et

P_v est la pression due à la vitesse de l'air, qui peut être calculée comme suit :

$$P_v = 0{,}5 \cdot \rho\ V^2 = 0{,}6 \cdot V^2 \text{ pour } \rho_{air} = 1{,}2\ kg/m^3.$$

Pour un écoulement laminaire, le facteur de friction varie simplement avec le débit, mais dépend aussi de la forme de la conduite. Pour les deux cas extrêmes de forme [31, 47] :

$f = 64/(Re \cdot \gamma)$, conduites circulaire, et

$f = 96\ (Re \cdot \gamma)$, écoulement canalisé (comme dans une cavité).

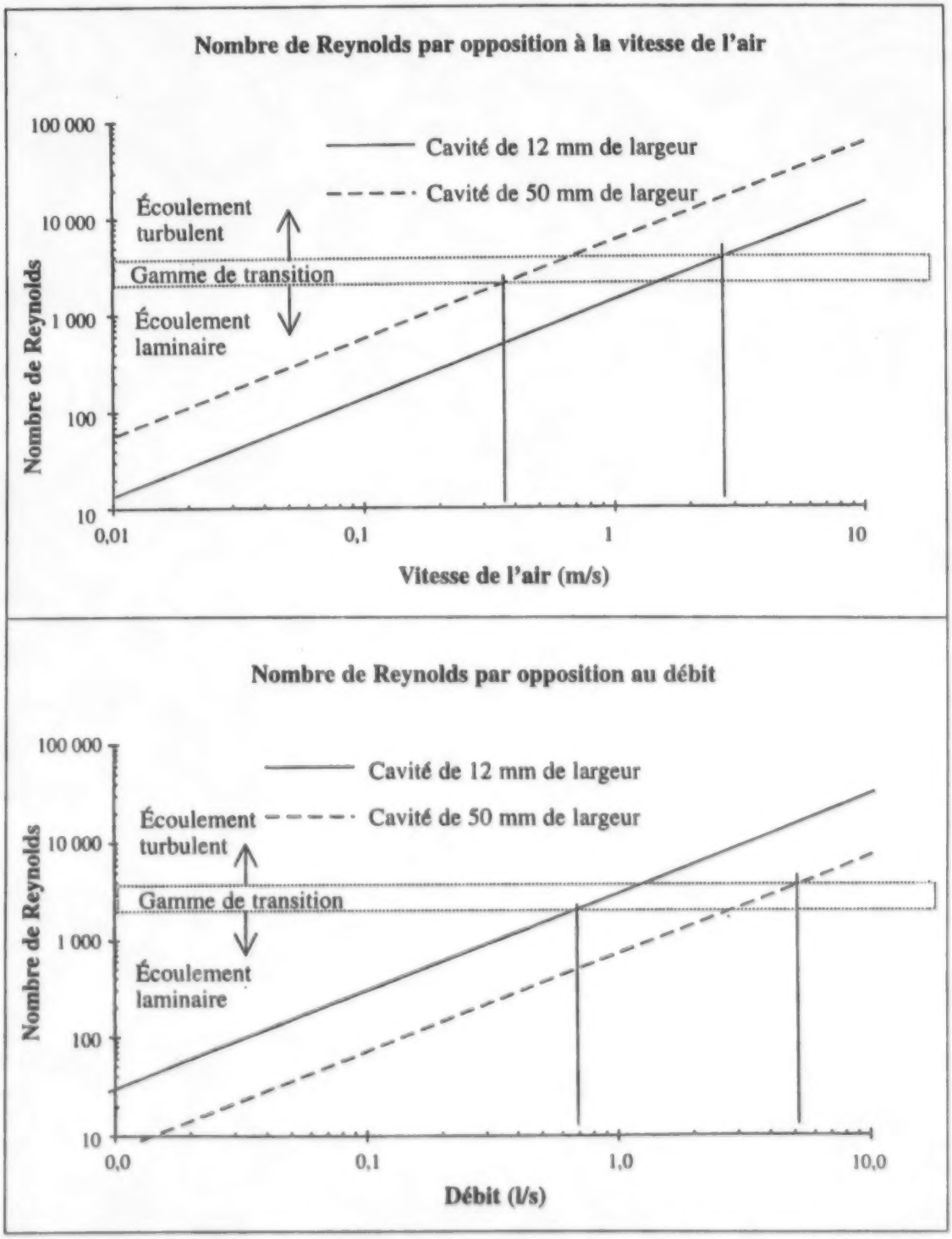


Figure 4.2 : Gammes de débit laminaire et turbulent dans des cavités murales

Un facteur de blocage, (, a été inclus pour tenir compte des cavités aux parois très rugueuses et (ou) partiellement obstruées. Ce facteur est approximativement égal à la réduction moyenne de la section transversale causée par une protubérance sur les parois de la cavité. Pour les cavités dégagées, (=1. Pour les cavités à petites protubérances (par exemple, le mortier de joints horizontaux dans un placage de briques soigneusement construit ou un placage de pierre avec le nombre normal de dispositifs d'ancrage), une valeur (de 0,8 peut être appropriée. Étant donné que de nombreux placages de brique présentent des cavités partiellement bloquées, la valeur de (peut être nettement inférieure à ce niveau.

Pour un écoulement turbulent, le facteur de friction varie considérablement avec le débit et la rugosité. Cependant, Altshul-Tsal a établi une approximation simplifiée [29] :

$$f = 0{,}11 \cdot \left(\frac{E}{D_h} + \frac{6}{Re}\right)^{0{,}25}, \text{ pour } f > 0{,}018$$

où E est la rugosité absolue, définie comme étant la hauteur moyenne de projection divisée par la largeur de la cavité.

D_h est le diamètre équivalent de la conduite et Re est le nombre de Reynolds.

Pour un débit de ventilation à travers une cavité fermée, on peut présumer que l'écoulement sera laminaire. La vitesse d'écoulement est simplement le volume du débit divisé par l'aire d'écoulement (V = Q/A). En combinant les équations, on peut donc calculer comme suit la perte de pression d'un écoulement laminaire d'air à travers une cavité murale :

$$\Delta P_{cavité} = \frac{V \cdot h}{692 \cdot \gamma \cdot D_h^2} = \frac{Q \cdot h}{4\,610 \cdot \gamma \cdot b \cdot d^3}$$

où d est la profondeur de la cavité,

h est la hauteur de celle-ci,

b est sa largeur,

γ est un facteur de blocage, et

Q est le volume d'écoulement (le tout en unités homogènes).

4.2 Débit d'air à travers les orifices

Il faut examiner deux types de cas liés au bâtiment : des orifices distincts et des chantepleures continues. En utilisant le coefficient de débit à travers les orifices standard à rebords aigus, on peut calculer comme suit la chute de pression exercée sur un trou servant d'orifice :

$$\Delta P_{orifice} = \left(\frac{Q}{0{,}65 \cdot A_{vent}}\right)^2$$

Le chapitre 2 traite du comportement du débit théorique et mesuré dans des orifices, et il faut le consulter et remplacer, dans l'équation, différents coefficients d'écoulement et exposants d'écoulement, pour plus de précision.

Le changement de direction du débit horizontal au vertical n'est pas susceptible d'influer beaucoup sur la plupart des débits de ventilation, car la vitesse d'écoulement est si faible. Bien que cette hypothèse reste à prouver, elle se fonde sur l'observation selon laquelle des orifices distincts contribuent à tel point à la résistance totale au débit, dans les murs, que la résistance à un changement de direction dans une cavité ouverte est relativement peu importante. Une faible augmentation de la résistance (de l'ordre de 10 % de la résistance au vent) peut convenir pour les débits d'entrée élevés, tandis que, pour des débits très faibles (conditions typiques de ventilation), aucune augmentation ne serait nécessaire.

4.3 Débit d'air à travers les chantepleures

Lorsque l'orifice consiste en une chantepleure continue (ou semi-continue), la cavité a tendance à contribuer largement à la résistance au débit, et le changement de direction dans l'orifice devient important. En nous basant sur les recherches effectuées en Europe [7, 9, 47] et sur la pratique en usage en Amérique du Nord dans les domaines du chauffage, de la ventilation et de la climatisation [29], nous suggérons l'approche suivante.

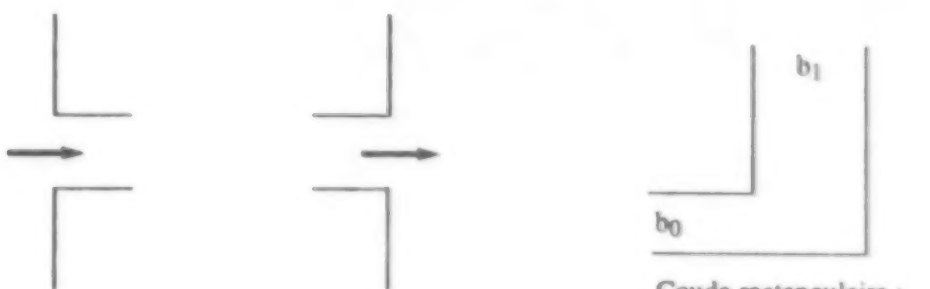
Les pertes se basent sur une fraction de la pression de vitesse dynamique comme suit :

$$\Delta P_{fente} = f\ )L/D_h) \cdot P_v = \xi \cdot P_v = \cdot (0{,}5 \cdot \rho \cdot V^2)$$

$$= \xi \cdot 0{,}6 \cdot V2 = \xi \cdot 0{,}6 \cdot (\frac{Q}{b \cdot d})^2$$

où ξ est un facteur de friction, V est la vitesse d'écoulement, et $\rho_{air} = 1{,}2\ kg/m^3$. La vitesse d'écoulement vise le débit à travers la chantepleure et non celui de la cavité.

Les valeurs suivantes de ξ sont utilisées depuis longtemps en pratique par les concepteurs européens [7, 9] :



Entrée :
$\xi = 0{,}5$

Sortie : b1
$\xi = 0{,}88$

Coude rectangulaire :
$\xi = 0{,}885 \cdot (b1/b0)^{-0.86}$

4.4 Circulation de l'air dans le mur

Au point d'équilibre, la chute de pression entre deux orifices et la cavité égalera la chute de pression attribuable aux forces motrices externes, ou

$$\Delta P_{motrice} = \Delta P_{orifice,\ entrée} + \Delta P_{cavité} + \Delta P_{orifice,\ sortie}$$

Pour de nombreux murs à orifices distincts et à écoulement laminaire, les orifices d'entrée et de sortie seront du même type et pourront être regroupés (pour d'autres systèmes, l'air pourra entrer et sortir par des points différents), et l'on peut simplifier les équations ci-dessus sous la forme suivante :

$$\Delta P_{motrice} = 2 \cdot \Delta P_{orifice} + \Delta P_{cavité} = 2 \cdot \left(\frac{Q}{0{,}62 \cdot A_{orfice}}\right)^2 + \frac{Q \cdot h}{4\,610 \cdot \gamma \cdot b \cdot d^3}$$

Dans le cas d'orifices distincts, la valeur de b est l'espace horizontal entre les orifices.

Pour un **système de panneaux avec chantepleures ouvertes continues :**

$$\Delta P_{motrice} = \Delta P_{chantepleure} + \Delta P_{cavité}$$

$$= \xi \cdot 0{,}6 \cdot \left(\frac{Q}{b \cdot d}\right)^2 + \frac{Q \cdot h}{4\,610 \cdot b \cdot d^3}$$

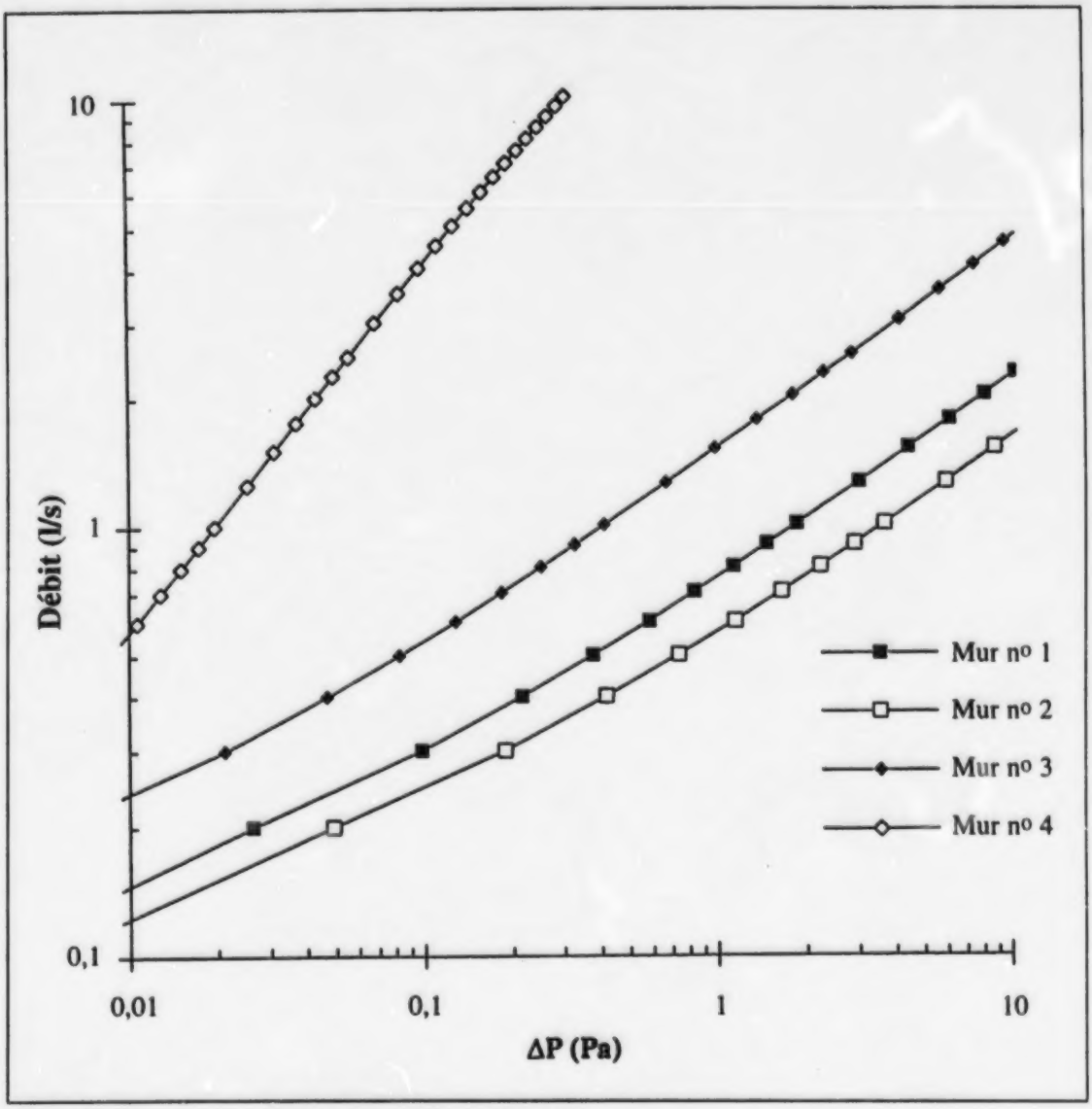
où, en présumant la même chantepleure en haut et en bas de la cavité, on peut regrouper les données d'entrée, de sortie et de résistance au changement de direction, sous la forme suivante :

$\xi = 0{,}5 + 2 \cdot \{0{,}885 \cdot (d/d_s)^{-0{,}86} = 0{,}88\}$, d_s étant la hauteur de la chantepleure.

Dans le cas d'un système à panneaux avec chantepleures, b peut désigner soit la largeur d'une unité, soit la largeur d'un panneau.

Par conséquent, connaissant les forces motrices et les caractéristiques du mur, on peut facilement calculer le débit de ventilation. La figure 4.3 illustre ce débit à travers les cavités de murs typiques et une gamme probable de forces motrices. Un facteur de blocage de 1, relativement peu probable dans les murs à placage de brique, a été employé pour produire la figure 4.3.

Les murs nos 1 et 2 de la figure 4.3 représentent des versions idéales des murs actuellement construits. À cause du blocage, les débits sont susceptibles d'être plus faibles que ceux indiqués. Le mur no 3 représente une paroi construite pour augmenter la ventilation; la surface de ventilation est trois fois plus grande que la normale et la cavité est deux fois plus profonde (pour réduire le risque de blocage). On peut voir que l'écoulement à travers ce mur est au moins le double que dans le cas des murs nos 1 et 2. Le mur no 4 représente un placage à panneaux appliqués à un immeuble de cinq étages. Le débit de ventilation à travers la cavité de ce système est plus de dix fois celui d'un mur typique à placage de brique.



En présumant une cavité et des orifices dégagés

Mur nº 1 : cavité de 2,4 m de hauteur et de 25 mm de profondeur, chantepleure supérieure de 12 mm en haut, et orifice de 10 mm sur 65 mm à 600 mm du bas

Mur nº 2 : cavité de 2,4 m de hauteur et de 25 mm de profondeur, orifices de 10 mm sur 65 mm espacés à 600 mm d'entraxe en haut et en bas

Mur nº 3 : cavité de 2,4 m de hauteur et de 50 mm de profondeur, orifices de 10 mm sur 65 mm espacés à 200 mm d'entraxe en haut et en bas

Mur nº 4 : cavité de 12 m de hauteur (cinq étages) et de 50 mm de profondeur, chantepleure de 12 mm pleine largeur en haut et en bas

Figure 4.3 : Débit de ventilation par rapport à la pression motrice dans certains murs typiques

5. Assechement par ventilation

5.1 Humidité

Pour comprendre comment on peut enlever l'humidité d'un mur par la ventilation et quelle quantité on peut ainsi retirer, il est utile d'examiner le comportement fondamental de l'humidité dans les murs et le processus d'assèchement en général. Le présent chapitre examine brièvement les sources d'humidité, l'accumulation disponible ainsi que les mécanismes d'enlèvement de l'humidité.

5.1.1 Sources d'humidité

L'humidité peut être présente dans une cavité murale sous forme de vapeur, de liquide et de solide, à partir de trois sources de base :

- pénétration ou absorption de pluie (ou de précipitation);
- condensation à partir de la diffusion et du mouvement de l'air à travers le mur, à la fois à partir de l'intérieur et de l'extérieur;
- accumulation d'humidité pendant la construction.

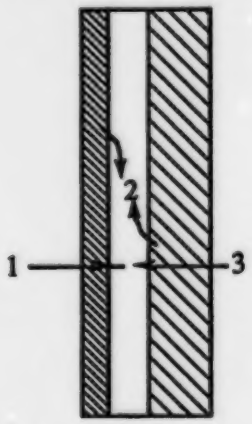


Figure 5.1 : Mécanismes d'accumulation de l'humidité dans une cavité (murs à écran pare-pluie)

L'humidité peut *pénétrer* dans une cavité murale au moyen des mécamismes généraux suivants (figure 5.1) :

1. pénétration de l'eau de pluie (ou de la neige et de la glace fondues) à travers l'écran;
2. désorption de l'humidité accumulée et conservée à partir de matériaux dans le mur (surtout l'écran); et
1 et 3. diffusion de la vapeur et mouvement de l'air dans la cavité à partir de l'intérieur ou de l'extérieur.

5.1.2 Accumulation d'humidité

L'humidité peut s'accumuler dans la cavité ou près de celle-ci, de diverses façons (figure 5.2) :

1. sous forme d'eau emprisonnée dans de petites dépressions, dans les bavures de mortier des murs à placage de brique, ou dans des sections mal drainées d'autres types de murs;
2. des gouttelettes (ou du givre) adhérant par tension de surface à l'arrière de l'écran ou à l'avant de la paroi interne;
3. en étant absorbée ou retenue par capillarité, dans des matériaux de construction hygroscopiques (surtout la brique, le bois, l'isolant fibreux, le papier, etc.) qui forment les parois de la cavité;
4. dans l'air de la cavité sous forme de vapeur.

Figure 5.2 : Accumulation de l'humidité dans les cavités des murs à écran pare-pluie

Le volume d'eau emmagasiné dans un mur peut être élevé, de l'ordre de plusieurs kg par mètre carré. Si ce volume dépasse le niveau sûr pour un matériau et s'il est présent durant assez longtemps, une détérioration peut se produire (p. ex., pourrissage du bois, dommage à la maçonnerie par gel-dégel, et corrosion du métal).

5.1.3 Enlèvement de l'humidité

L'humidité doit être enlevée de la cavité et des matériaux connexes de plusieurs façons (figure 5.3) :

1. drainage, par gravité;
2. évaporation à partir de la surface extérieure de l'écran;
3. diffusion et fuites d'air vers l'extérieur à travers l'écran, et vers l'intérieur dans le mur ou l'intérieur du bâtiment;
4. écoulement de masse de l'air dans la cavité, ventilation;
5. transport capillaire vers des matériaux connexes plus secs.

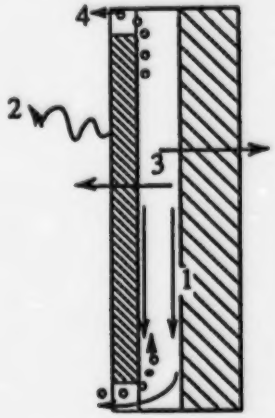


Figure 5.3 : Mécanismes d'enlèvement de l'humidité dans les cavités des murs à écran pare-pluie

Le drainage peut enlever le plus gros volume d'eau le plus rapidement, et il est de toute évidence le mécanisme le plus important du contrôle de l'humidité dans les murs à écran pare-pluie. S'il existe une voie d'écoulement dégagée, une bonne partie de toute l'eau de pénétration s'écoulera en dehors de la cavité murale. Cependant, même dans les murs parfaitement construits, un important volume d'eau demeurera fixé par la tension de surface aux parois de la cavité et aux dispositifs d'ancrage du mur, etc., et restera emprisonné dans les innombrables petits barrages, passages, bavures et dépressions de mortier. Les matériaux formant la cavité (p. ex., mortier, briques, revêtements) absorberont et emmagasineront aussi d'importants volumes d'eau. La condensation aura tendance à déposer l'humidité lentement et, par conséquent, à donner, au matériau sur lequel se produit la condensation (p. ex., placage de plâtre ou panneaux à grandes particules) le temps d'absorber l'humidité déposée. Dans cette situation, le placage ou le revêtement doit être pratiquement saturé avant qu'un important volume d'eau perle à la surface, permettant le drainage. Par conséquent, on doit présumer que toute l'humidité emmagasinée ou déposée dans la cavité ne sera pas évacuée uniquement par drainage.

L'humidité dans les écrans saturés peut s'évaporer vers l'extérieur mais l'évaporation peut durer longtemps dans certains matériaux d'écran (bois, brique). L'évaporation à partir des briques peut enlever une forte quantité d'humidité; les calculs théoriques et les expériences en laboratoire suggèrent que des taux de 200 à 300 g/m2/h sont possibles [48]. Lacy [49] a mesuré les taux d'évaporation à partir des briques sur place et a déclaré des taux maximaux de 68 g/m2/h durant quelques heures, 20 g/m2/h pour quelques jours, et 1 à 7 g/m2/h la plupart du temps (lorsque les murs n'étaient vraisemblablement pas saturés). Schwarz a mesuré des taux situés entre 500 et 200 g/m2/h (selon l'influence du chauffage solaire et la vitesse du vent), immédiatement après des rafales de pluie [50]. Notez que les taux d'évaporation seront vraisemblablement les mêmes pour les placages de bois, de béton et de pierre, car ils sont tous à l'étape I d'assèchement. Malheureusement, la plus grande partie de l'évaporation se produit à partir de la surface extérieure, et la paroi intérieure de la brique demeurera humide plus longtemps. Le chauffage solaire de l'écran (surtout si celui-ci est en brique) peut souvent causer de l'évaporation à partir de la paroi intérieure et une condensation sur cette paroi dans la cavité [51-53]. Cette humidification de la paroi intérieure de la cavité ne peut être enlevée que par diffusion, par ventilation et, dans les cas extrêmes de saturation, par drainage.

Pour les murs au parement très résistant à la vapeur, la résistance à la diffusion retardera largement l'assèchement de la paroi intérieure. La ventilation est importante, car c'est un mécanisme capable d'enlever l'humidité qui subsiste derrière les écrans ayant une forte résistance à la vapeur d'eau.

5.2 Le processus d'assèchement

Les matériaux hygroscopiques dans les cavités murales sèchent par évaporation et désorption. L'eau libre dans le matériau est évacuée d'abord par évaporation à la surface du matériau, puis remplacée par l'eau qui se déplace à travers le matériau, vers la surface relativement plus sèche. Lorsque le matériau n'est plus saturé, la désorption commence [54, 55]. Le taux d'évaporation de l'eau libre est beaucoup plus élevé que le taux de désorption. Les deux processus et leurs différents résultats entraînent un flux d'humidité (ou un taux d'assèchement) comprenant deux étapes nettement distinctes (figure 5.4) [48, 50] :

> L'étape I est le taux d'assèchement à surface saturée. On croit qu'il est approximativement égal à celui de l'évaporation de l'eau libre, dans les mêmes conditions, et constant; de sorte qu'il ne varie pas nettement d'un matériau à l'autre.
>
> L'étape II est le taux d'assèchement par désorption. Il est contrôlé par les propriétés matérielles, le rapport surface-volume, et les conditions de l'air ambiant, telles que décrites par l'isotherme de sorption. Le taux diminue à mesure que le matériau approche de l'équilibre avec son milieu.

Dans une cavité murale, l'assèchement pendant les deux étapes sera modifié par [56, 57] :

- le volume, les divers degrés d'humidification et de saturation, ainsi que la distribution de différents matériaux et de différentes parties du mur;

- le débit et la nature du flux d'humidité dans le mur (par écoulement d'air, diffusion ou pluie);
- les conditions et gradients de pression de la température et de la vapeur;
- les différents isothermes de sorption des matériaux hygroscopiques;
- la résistance à la vapeur des différentes couches du mur;
- le débit d'écoulement de l'air à travers la cavité;
- les conditions extérieures de l'air ambiant.

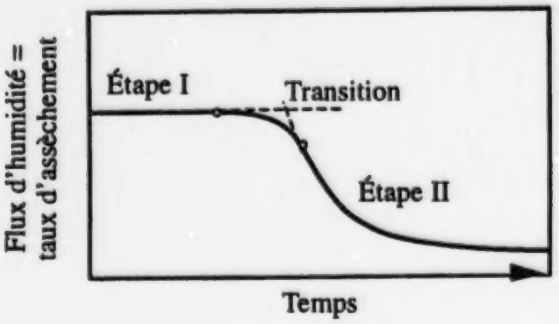


Figure 5.4 : Étapes de l'assèchement pour un matériau hygroscopique saturé

Bien que le taux d'assèchement de l'étape I soit probablement le même que pour l'eau libre dans les mêmes conditions [48, 50], il est également difficile d'évaluer le taux d'évaporation de l'eau libre. Pour certains matériaux, géométries et conditions de l'air ambiant, le transport de l'eau à travers le matériau saturé peut ne pas remplacer l'eau de surface aussi rapidement que celle-ci est enlevée par l'évaporation; en de tels rares cas, l'écoulement d'eau à travers le matériau contrôlera l'assèchement pendant l'étape I. Pourvu que de l'eau libre soit disponible sur une surface constante, le taux d'assèchement de l'étape I demeurera approximativement constant, de même que la température de l'air et la pression de la vapeur. Le taux d'assèchement de l'étape II suit généralement une diminution exponentielle en fonction d'une température de l'air et d'une pression de vapeur constantes.

L'examen des deux étapes d'assèchement permet de s'attendre à ce que les cavités murales initialement saturées présentent un taux d'assèchement initialement élevé et constant (étant donné que toute l'eau libre et de surface est évaporée) et une diminution exponentielle du taux d'assèchement, car tous les matériaux hygroscopiques de la cavité murale approchent de leur teneur en humidité d'équilibre. Entre ces deux extrêmes, il y aura une transition où le séchage sera attribuable à une combinaison des deux étapes.

Des conditions constantes de température de l'air et de pression de vapeur ne sont pas répandues dans le milieu naturel, et, dans une cavité murale, peuvent se produire durant quelques heures tout au plus. Pendant la journée, le rayonnement solaire peut modifier la température de l'écran si vite que même une moyenne horaire n'est pas assez précise pour saisir toute la gamme du

comportement. Les variations environnementales prévues peuvent être surimposées aux chiffres hypothétiques d'assèchement, pour donner un aperçu de diagramme d'assèchement.

5.2.1 Transport de la vapeur d'eau : diffusion

La loi de Fick régit la diffusion de la vapeur à travers n'importe quel matériau (y compris l'air). La masse de vapeur qui se diffuse à travers une surface unitaire pendant un temps unitaire (w) peut se calculer comme suit :

$$w = - \mu \frac{d\,p}{d\,x}$$

où μ est la perméabilité (une propriété matérielle), p est la pression de vapeur et x est la distance parcourue le long du circuit d'écoulement.

On peut évaluer la diffusion à travers un système à plusieurs couches en utilisant une résistance totale de vapeur calculée exactement de la même façon que pour le flux de chaleur. En pratique, la loi de Fick est normalement simplifiée comme suit :

$$m_w = \frac{1}{\mu_1 \bullet\bullet\bullet = \mu_x \bullet\bullet\bullet = \mu_n} \bullet \Delta P_v \bullet A \bullet \Delta t$$

où m_w est la masse de la vapeur d'eau transférée,

μ_x est la perméabilité moyenne de vapeur du nombre de couches x,

ΔP_v est la différence de pression de vapeur, A est l'aire, et Δt est le temps.

La vapeur s'écoulant à partir d'une surface d'assèchement jusqu'à l'air doit vaincre la résistance opposée par un film de surface au transfert de masse. L'envergure du coefficient de ce film de surface est encore mal connue dans le cas d'une diffusion pure, mais on considère qu'elle se situe à $1{,}34 \times 10^{-5}$ g/N • s pour la terre saturée dans un vide sanitaire en dessous du plancher, à $2{,}5 \times 10^{-5}$ g/N • s pour les piscines pendant les accalmies [58], et entre 1,7 et $10{,}2 \times 10^{-5}$ g/N • s pour les échantillons de murs saturés, exposés à des vitesses de vent de 1 à 8 m/s [50]. Au cours de tests de perméabilité de la vapeur, effectués en laboratoire, Burch [59] a découvert un coefficient de transfert de la vapeur d'eau en film de $2\,874 \times 10^{-6}$ g/N • s ; c'est un ordre de grandeur inférieur, probablement parce qu'il a pu éviter toutes les circulations d'air par convection, attribuables à la chaleur et à l'humidité, sur la surface. La corrélation de Lewis, décrite plus loin, peut servir à évaluer la valeur du coefficient de transfert de masse, dans de nombreuses conditions géométriques, de température et de débit.

Tel que décrit ci-dessus, pendant la première étape du séchage, étant donné un coefficient de film de surface à transfert de masse, g, on peut calculer approximativement le transfert de masse attribuable uniquement à la diffusion, d'une surface humide à une cavité de bâtiment :

$$m_w = g \bullet A \bullet \Delta P \bullet \Delta t$$

où mw est la masse totale de vapeur d'eau transportée,

A est l'aire de la surface humide, ΔP est la pression motrice de vapeur, et Δt l'intervalle de temps.

Dans l'air stagnant, le transfert de masse calculé par l'équation ci-dessus peut être largement réduit par la résistance de l'air lui-même à la vapeur, et par l'effet d'évaporation de l'eau qui accroît la pression de la vapeur de l'air près de la surface, et réduit la température de la surface d'évaporation.

La diffusion est habituellement attribuable à une différence de pression de vapeur (et parfois selon un gradient de température). La différence de pression normalement considérée est celle qui se trouve dans la pression de vapeur à travers l'enveloppe, c'est-à-dire, la différence entre les milieux intérieur et extérieur. Dans certains cas, normalement quand le mur est humide, la différence de pression de vapeur entre certaines parties de l'enveloppe (surtout l'écran) et, soit une autre partie de l'enveloppe (habituellement la paroi interne), soit les milieux intérieur ou extérieur, est importante (voir la section 5.1.3).

5.2.2 Transport de la vapeur d'eau : débit massique

Le transport de l'humidité à partir d'une surface libre par pure diffusion est peu probable dans la plupart des situations, étant donné qu'il y a toujours une certaine circulation de l'air, soit à cause de forces motrices provenant de l'extérieur du système, soit parce que l'évaporation provoque des gradients de température et de vapeur donnant lieu à une circulation d'air.

L'échange d'air à proximité d'une surface d'assèchement et le débit massique de l'air à travers la surface d'un matériau peuvent largement augmenter le taux d'assèchement. Le débit massique peut accélérer le séchage en raison de deux effets :

- L'échange de l'air entourant un matériau d'assèchement avec de l'air sec permet de s'assurer que la différence de pression de vapeur (et donc le taux d'assèchement) ne changera pas. On présume généralement que le mélange est parfait dans une cavité de bâtiment avec un débit massique, mais la validité de cette hypothèse dépend des différences de pression de vapeur, du taux du débit massique, ainsi que de la géométrie de la cavité.
- En déplaçant de l'air au-dessus d'une surface, on élimine essentiellement la résistance de l'air à la diffusion, et seule subsiste la résistance du film de surface, laquelle est beaucoup plus faible lorsque l'air est en mouvement que dans de l'air stagnant.

Échange d'air

Le mouvement de l'humidité (à un taux connu d'évaporation ou de désorption), à partir des matériaux de la cavité jusqu'à une chambre où l'air est bien brassé, peut être illustré de manière schématique comme dans la figure 5.5. Une telle chambre est une hypothèse raisonnable, à cause de la convection interne susceptible de se produire à la suite de la poussée de la température et de l'humidité, ainsi que de la résistance relativement faible de l'air à la diffusion de la vapeur. Ce mélange est une des raisons pour lesquelles le débit de ventilation est un mécanisme de séchage beaucoup plus efficace que les fuites d'air.

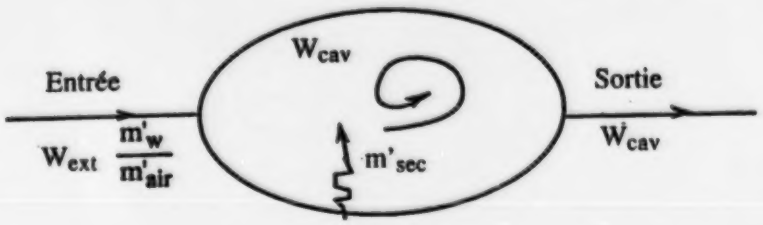


Figure 5.5 : Modèle simple de chambre de mélange dans une cavité

Le débit de la vapeur dans la cavité (à partir de l'air extérieur ou, peut être, de l'exfiltration de l'air intérieur), ajouté au débit de la vapeur à cause du séchage, déterminera l'équilibre de la vapeur d'eau à l'intérieur de la cavité et, par conséquent, le potentiel moteur d'un meilleur assèchement. En terme de fractions de masse (c'est-à-dire, d'humidité spécifique) :

$$W_{cav} = \frac{(W_{ext} \bullet m'_{air} + m'_{sec})}{m'_{air}} \bullet \frac{\Delta t}{\Delta t} = W_{ext} + \frac{m'_{sec}}{m'_{air}}$$

où W_{cav} est l'humidité spécifique de l'air de la cavité (kg d'eau/kg d'air),
W_{ext} est l'humidité spécifique de l'air extérieur ou de ventilation (kg d'eau/kg d'air),
m'_w est le débit massique de la vapeur d'eau dans l'air de ventilation (kg d'eau/temps),
m'_{air} est le débit massique de l'air de ventilation (kg d'air/temps), et
m'_{sec} est le taux d'assèchement de l'ensemble des matériaux de la cavité (kg d'eau/temps).

L'usage d'un mélange simple permet d'effectuer des calculs reliant le taux de ventilation et le taux d'assèchement à la différence de l'humidité spécifique entre l'air de la cavité et celui de l'extérieur.

Circulation d'air sur une surface

La circulation d'air dans une cavité encourage l'assèchement de celle-ci, car l'air en mouvement augmente le transfert d'humidité à partir d'une surface humide jusqu'à l'air. L'assèchement accéléré causé par le passage de l'air au-dessus d'une surface peut être calculé au moyen de la corrélation de Lewis [29, 54] portant sur l'analogie entre le transfert de chaleur et le transfert de masse. La résistance au débit offerte par la vapeur d'eau à la surface peut se définir sous forme d'un coefficient de perte thermique par convection, h_{conv}, comme suit :

$$g = \frac{h_{conv}}{R_v \bullet T \bullet p \bullet c_p}$$

où R_v est la constante des gaz pour la vapeur d'eau, T est la température absolue,
p est la densité de l'air, et c_p est la capacité thermique massique de l'air.

Cette relation est très utile car h_{conv} a été défini sur le plan théorique et empirique, pour une grande variété de conditions et de géométries de flux, tandis que le coefficient de transfert de masse, g, n'est connu que pour quelques cas. Bien que certaines recherches [59] suggèrent que la corrélation de Lewis

ne soit pas entièrement exacte pour un écoulement laminaire (c'est-à-dire, les situations courantes en matière de cavité dans un bâtiment), elle demeure une approximation relativement précise.

Les coefficients de transfert thermique dépendent essentiellement de la vitesse d'écoulement (nombre de Reynolds), du régime d'écoulement (laminaire ou turbulent), des propriétés des gaz (nombre de Prandtl), et de la géométrie du chenal d'écoulement [60]. Voici quelle est la relation de transfert thermique dans le cas d'une convection forcée de l'air dans le régime d'écoulement laminaire, entre des plaques parallèles [61] :

$$h_{conv} = 3{,}66 + \frac{0{,}104 \cdot Re \cdot Pr \cdot D/L}{1 + 0{,}016\,)Re \cdot Pr \cdot D/L)^{0{,}8}}$$

où, h_{conv} est le coefficient de transfert de chaleur par convection,

Re et Pr sont respectivement les nombres adimensionnels de Reynolds et Prandtl,

D est le diamètre hydraulique (deux fois la largeur de la cavité), et

L est la longueur du circuit d'écoulement.

En utilisant la corrélation de Lewis, on peut calculer comme suit le coefficient de transfert d'humidité, g :

$$g = \frac{h_{conv}}{R_{wv} \cdot T \cdot \rho \cdot c_p} = \frac{h_{conv}}{0{,}4615 \cdot 283 \cdot 1\,200 \cdot 0{,}00103}$$

Pour des nombres de Reynolds de 10 à 2 300 (c'est-à-dire, un écoulement laminaire), le coefficient de transfert de film d'humidité, prédit par la relation ci-dessus, se situe entre 6 et 12 • 10^{-3} g/s.m^2.Pa, pour des cavités d'une largeur de 25 à 50 mm, et d'une hauteur de 2,5 m à des températures normales.

Notez que, comme il fallait s'y attendre, le transfert de masse de l'eau à partir d'une surface exposée à un mouvement d'air est beaucoup plus facile que dans le cas de l'air stagnant (où il se situe autour de 1,5 • 10^{-5}). Par exemple, le transfert d'humidité à partir d'un mur à cavité complètement saturé à 20 °C ($P_{v,sat}$ = 2 300 Pa) vers un air de cavité à 19 °C et à 80 % d'humidité relative (P_v = 1 650 Pa) serait de 6 • 10^{-3} • (2 300 – 1 650) = 3,9 g/s/m^2 ou 14 kg/h/m^2! Naturellement, l'écoulement d'air à travers la cavité est insuffisant pour évacuer toute cette humidité évaporée, et, à la longue, l'humidité relative de la cavité atteint un équilibre avec la face humide de la cavité. De plus, l'énergie requise pour l'évaporation de cette humidité ne sera généralement pas disponible. Des taux élevés d'évaporation entraîneront aussi une forte baisse de la température de surface, ainsi qu'une réduction consécutive du taux d'évaporation.

Ces calculs mènent à l'importante conclusion suivante :

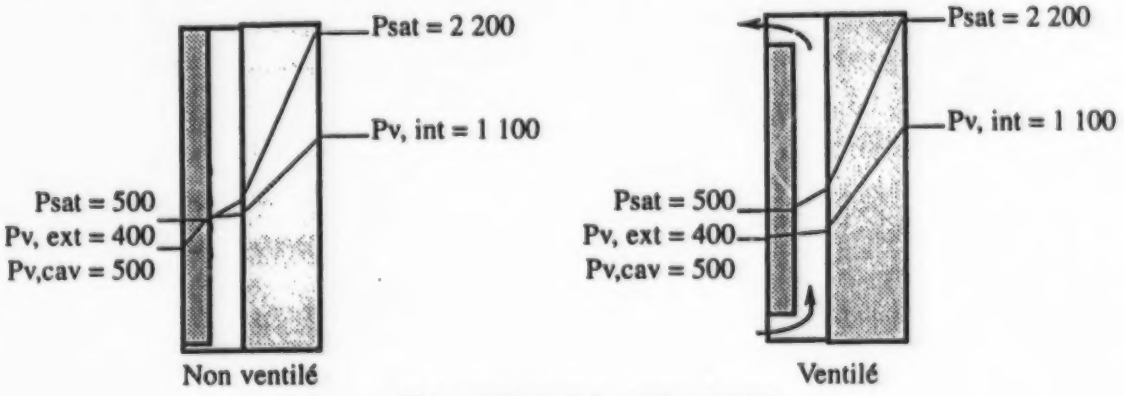
> **Étant donné que le taux de transfert de l'humidité à partir d'une surface humide vers l'air est élevé, et que le volume de l'air dans la cavité est faible, il s'ensuit que, pour tous les murs à cavité, le taux d'assèchement des matériaux formant la cavité sera déterminé par la vitesse à laquelle l'humidité de l'air évacuera la cavité.**

Cette affirmation est vraie pour la partie initiale de l'étape II de l'assèchement, ainsi que pour l'étape I.

5.3 Perméance à la vapeur équivalente

Le potentiel de ventilation est important pour les murs à écran pare-pluie et à cavités, car l'écran présente souvent une résistance relativement élevée à la vapeur (p. ex., brique, placage inorganique, acier et pierre). Il est important de noter que le débit d'air peut être un mécanisme de transport de la vapeur d'eau beaucoup plus puissant que la diffusion. Le concept d'une perméance équivalente à la vapeur d'eau d'une cavité, avec un taux d'échange d'air, est très utile pour évaluer l'efficacité potentielle de la ventilation : on trouvera ci-après un calcul de la perméance équivalente à la vapeur pour le transport combiné de la masse et de la diffusion.

L'importance relative du débit massique pour le transport de l'humidité, à travers l'écran d'un mur, peut être évaluée en appréciant le rendement prévu de la vapeur, grâce à un exemple de mur non ventilé. La valeur de la SCHL pour la perméance à la vapeur d'un mur de brique est d'environ 45 Pa/ng • s • m^2, ce qui en fait un pare-vapeur de type 2. Les valeurs employées en Grande-Bretagne [62, 63] présentent une gamme de 25 à 100 Pa/ng • s • m^2; en Allemagne elles oscillent entre un minimum de 20 et un maximum de 400 Pa/ng • s • m^2, (voir la section 1.8). Les calculs du gradient de vapeur à travers une maison typique à charpente de bois montrent que la condensation est fréquente. Si l'humidité pénètre à travers le pare-air et pare-vapeur de l'assemblage de polyéthylène et de plaques de plâtre, des quantités considérables d'eau peuvent se déposer à l'arrière de la brique ou dans le mur proprement dit. Cependant, dans un mur ventilé, la pression de vapeur dans la cavité diminuerait et l'on pourrait éviter la condensation (figure 5.6).



Note : pressions de la vapeur en pascals

Figure 5.6 : Effet de la ventilation sur la condensation derrière un placage résistant à la vapeur

Il est possible de provoquer une résistance combinée à la vapeur, sur une couche murale combinant les effets à la fois de la diffusion et du débit massique. La masse d'eau dans l'air peut être déterminée à partir d'une forme de la loi des gaz parfaits (voir la section 3.3.2) :

$$w_w = \frac{p_v \cdot V}{R_{wv} \cdot T}$$

où w_w est la masse d'eau (kg),

p_v est la pression de vapeur de l'eau (Pa),

V est le volume d'air (m^3),

R_{wv} est la constante des gaz pour l'eau (461,5 J/kg.K), et

T est la température (K).

Par conséquent, pour une différence dans la pression de vapeur, en présumant un air bien brassé, la masse d'eau transportée par un échange de volume d'air est la suivante :

$$\Delta w_w = \frac{\Delta p_w \cdot \Delta V}{R_{wn} \cdot T}$$

Le transfert de la vapeur d'eau à travers une couche murale est la perméance à la vapeur. Pour un débit d'air de 0,28 litre à la seconde (0,00028 m^3/s = 1 m^3/h), une différence de pression de vapeur de 1 Pa, et une température moyenne de 15 °C, la masse de l'eau transférée, ou la perméance équivalente attribuable seulement à la ventilation, est :

$$\Delta w_w = \frac{\Delta p_w \cdot \Delta V}{R_{wv} \cdot T}$$

$$\Delta w_w = \frac{1 \cdot 0{,}00028}{461{,}5 \cdot (273+15)} \cdot 10^{12} \text{ ng/kg}$$

$$= 2\ 100 \text{ ng} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2/\text{Pa}.$$

Cette valeur de la perméance est de plus de quarante fois supérieure à la valeur de la SCHL pour un placage de 90 mm en maçonnerie de brique. Cela montre qu'à tout le moins, la ventilation peut jouer un rôle très important pour contourner la résistance à la vapeur du placage de brique.

Pour tenir compte de la résistance du mur de brique, on peut utiliser une analogie avec un circuit en parallèle, et calculer une résistance et une perméance équivalentes :

$$\frac{1}{R_{équiv}} = \frac{1}{R_{v,orifice}} + \frac{1}{R_{v,écran}} = M_{v,orifice} + M_{v,écran}$$

Dans ce cas, la résistance de l'écran à la diffusion de la vapeur est négligeable. Même avec un taux de ventilation de 0,1 m^3/h seulement, le transfert de la vapeur à l'extérieur de la cavité par le transport de masse sera vraisemblablement de quatre à cinq fois supérieur à celui attribuable à la diffusion. Le tableau 5.1 énumère la perméance à la vapeur de ventilation équivalente d'un mur à écran pour divers taux de ventilation.

Débit de ventilation l/m² • s	Perméance à la vapeur équivalente ng • s • m² /Pa
0,05	375
0,10	750
0,25	1 875
0,50	3 750
1,00	7 500
3,00	22 600

Note : En comparaison, la perméance à la vapeur d'un placage de brique et de bois est d'environ 50 ng • s • m²/Pa.

Tableau 5.1 : Perméance à la vapeur équivalente pour divers débits de ventilation

La vitesse de l'air dans une cavité de 2,5 m de hauteur et de 25 mm de profondeur, nécessaire pour produire 2,5 m³/h de débit d'air (0,28 l/s/m²) est de 0,028 m/s. Bien que très faible, cette vitesse est difficile à mesurer et les pressions nécessaires pour produire le petit débit sont généralement jugées négligeables (c'est-à-dire que $\Delta P << 1$ pascal); malgré tout, le tableau 5.1 confirme que de tels débits peuvent avoir un effet draconien sur la perméance à la vapeur réelle de l'écran pare-pluie.

Pour la plupart des écrans typiques (placage de vapeur, de brique, de métal, béton préfabriqué), la résistance à la diffusion de la vapeur est très forte et la performance satisfaisante des murs peut s'expliquer par la ventilation, même excessivement faible, de la cavité. Si le drainage de la condensation était le seul mécanisme d'assèchement disponible, l'arrière du placage devrait être si humide qu'il y aurait assez d'eau pour le drainage, ce qui pourrait causer des dommages.

5.4 Évaluation de l'assèchement par ventilation

La perméance équivalente de ventilation peut facilement remplacer celle d'un placage de brique dans une analyse standard du flux de vapeur Glaser. Cette analyse montre qu'un taux de ventilation relativement faible (p. ex., moins de 0,25 l/s) réduira largement le risque de condensation à l'arrière d'un placage de brique.

On peut aussi entreprendre une analyse Glaser pour tenir compte, à un niveau très simple, des fuites d'air et de la ventilation, en calculant une perméance équivalente pour le pare-air (c'est-à-dire, en supposant un taux de fuite). Si les fuites du pare-air sont élevées ou concentrées à un emplacement, le débit change le profil de température du mur dans une mesure telle que l'analyse ne pourrait même pas être approximativement exacte.

En formulant les hypothèses d'assèchement décrites à la section 5.2 (c'est-à-dire, que les parois de la cavité sont saturées et que le taux d'assèchement est contrôlé par le taux de ventilation), et

en utilisant le concept de perméance équivalente élaboré ci-dessus, on peut calculer le taux maximal d'assèchement par ventilation pour diverses conditions de température de cavité et extérieure. Il est plutôt simple de produire des courbes potentielles d'assèchement, étant donné les conditions extérieures moyennes mensuelles.

La figure 5.7 présente les résultats des calculs basés sur la perméance de la ventilation et utilisant des données météorologiques moyennes pour Waterloo (Ontario) (c'est-à-dire, la pression de vapeur de l'air extérieur et celle d'une cavité saturée) durant quatre mois de l'année. Par exemple, étant donné un débit de ventilation de seulement 0,1 l/s, on peut atteindre un taux d'assèchement maximal de 10 g/jour en janvier et d'environ 100 g/jour en juillet. En pratique, il est vraisemblable que l'on puisse atteindre des débits de 0,5 à 1 l/s avec une conception et une construction de mur bien ventilé (voir la figure 4.3). La figure 5.7 montre que des débits de ventilation de cette envergure peuvent enlever l'humidité, même en hiver.

La figure 5.8 donne un organigramme pour évaluer l'efficacité de la ventilation de manière plus individuelle et précise que les tableaux et les graphiques présentés jusqu'à présent dans notre rapport.

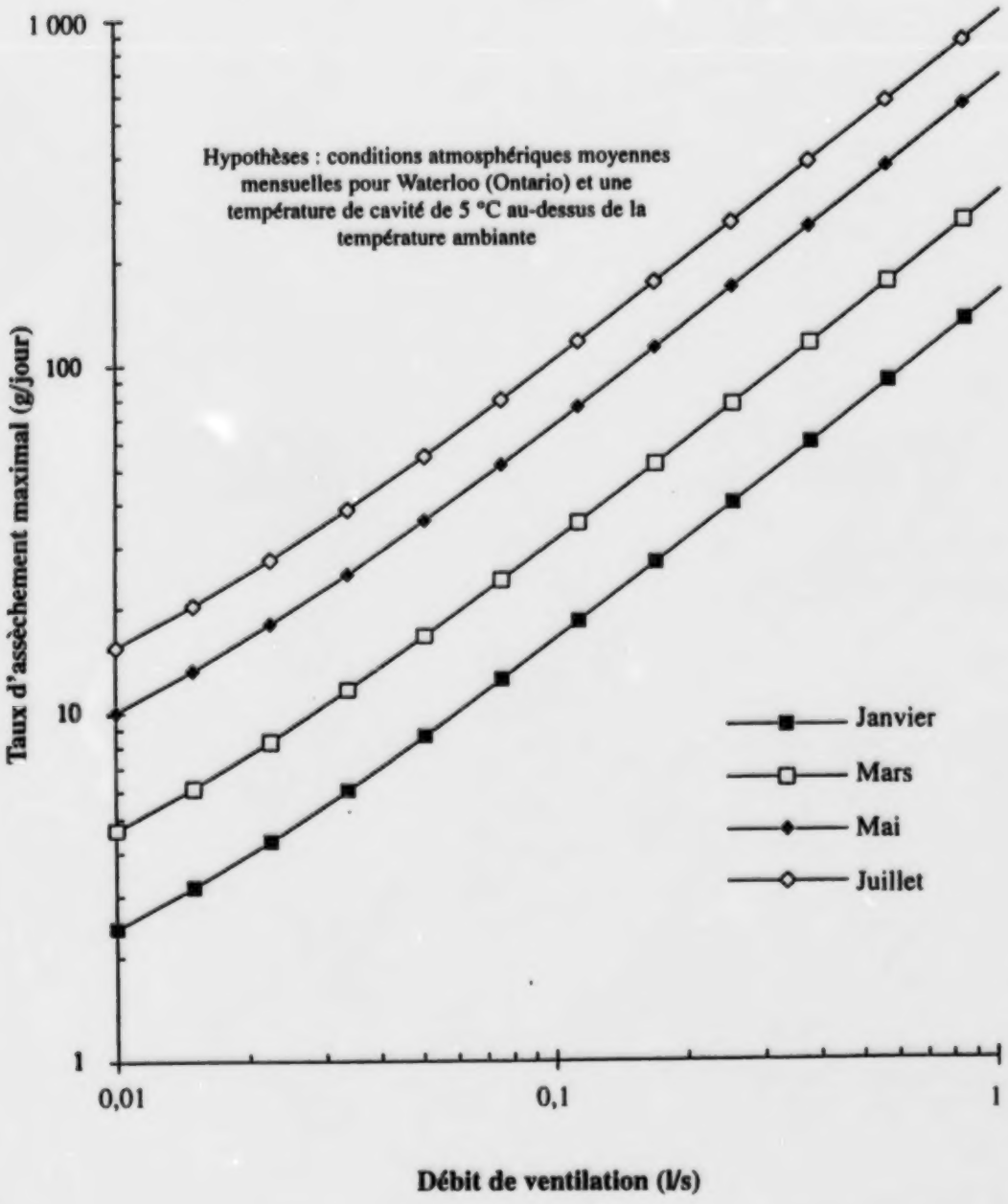


Figure 5.7 : Potentiel d'assèchement par ventilation par rapport au débit de ventilation pour Waterloo (Ontario)

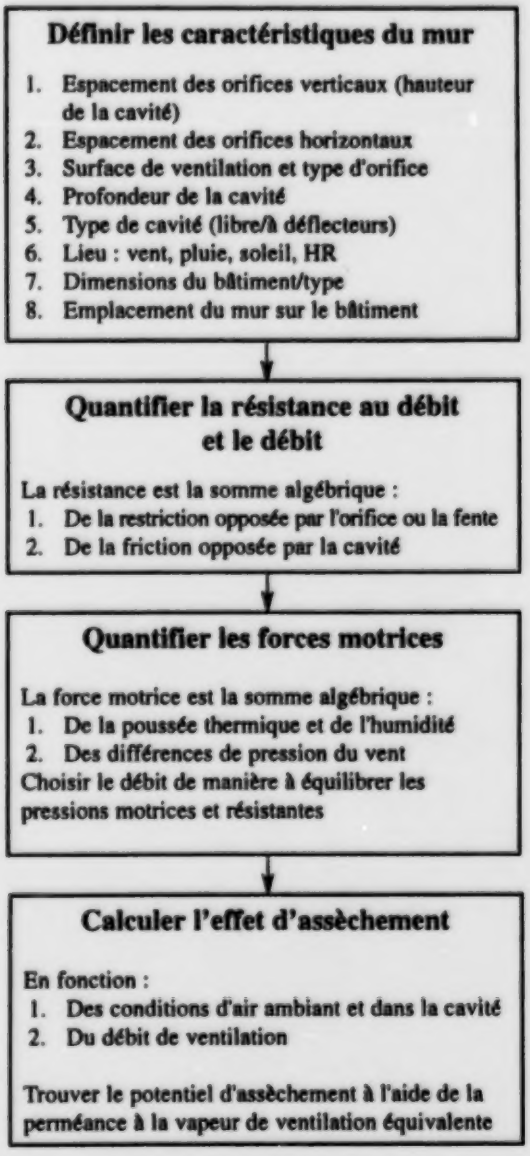


Figure 5.8 : Procédure d'évaluation de la ventilation

5.5 Contrôle de l'humidification attribuable à la ventilation

Seul le potentiel d'assèchement a été explicitement examiné dans le présent rapport. Il y a cependant des cas où la ventilation peut entraîner de l'humidification. Pour que la ventilation soit avantageuse, son potentiel d'assèchement doit être largement supérieur à son potentiel d'humidification.

Pour des revêtements thermiques légers avec des cavités (les placages métalliques sont spécialement vulnérables) et des toits bien ventilés, la condensation nocturne peut causer de l'humidification. Il faut choisir soigneusement les dimensions maximales et minimales de ventilation pour ces systèmes.

Pour la plupart des systèmes muraux, le placage est plus chaud que l'air extérieur (en raison du chauffage solaire, de la masse thermique, et, en hiver, du débit de chaleur vers l'extérieur), et la possibilité et la durée de la condensation dans la cavité sont faibles. Ce danger existe seulement si les pertes de rayonnement réduisent la température du placage en dessous de la température ambiante. Pour les placages de brique, on peut considérer comme pratiquement négligeable la possibilité d'une condensation nocturne sur la paroi interne.

Si, à l'intérieur, la cavité fait face à une isolation très perméable à la vapeur et à l'air (c'est-à-dire qu'il s'agit entièrement d'isolant en fibres minérales sans une certaine quantité de revêtement), une condensation peut se former sur les feuilles sous-jacentes dans les bâtiments climatisés. Pour la plupart des murs, ce phénomène risque peu de devenir un problème car la différence de température estivale entre l'air extérieur et intérieur dépasse rarement 10 °C, et une barrière contre l'écoulement d'air et d'eau est souvent située à l'extérieur d'une certaine isolation. En fait, la plupart des inversions importantes du débit de vapeur sont attribuables à une évaporation solaire de l'eau à partir d'écrans poreux, et la ventilation peut largement contribuer à réduire la pression de vapeur dans la cavité et à enlever l'humidité, diminuant ainsi le potentiel de condensation.

Étant donné qu'en été, d'importantes poussées de vapeur vers l'intérieur se produisent dans tous les murs à placage, et qu'un vent excessif et un refroidissement par convection se produiront dans les revêtements d'isolation fibreux de faible densité, il faut prévoir un revêtement à l'extérieur (côté cavité) de ces produits. Ce revêtement réduira largement la probabilité de condensation estivale provoquée par la ventilation et la diffusion interne, tout en diminuant la perte de chaleur par convection.

L'addition d'orifices augmente le risque que la pluie poussée par le vent pénètre dans la cavité. Même si l'on estime que la quantité de pénétration de l'eau dans la plupart des orifices est faible ou négligeable, cette question mérite des recherches plus approfondies.

6. Conclusions et recommandations

6.1 Conclusions

Une ventilation, même faible, peut produire d'importants avantages pour le rendement des murs, surtout en enlevant l'humidité de derrière l'écran. Si l'on aménage des cavités non obstruées et plusieurs gros orifices dans un mur à écran pare-pluie, un gros débit de ventilation d'air peut se produire, même avec les pressions motrices très faibles qui se produisent habituellement en service. Les mêmes mesures permettront de modérer les différences de pression du vent à travers l'écran.

La ventilation est surtout occasionnée par une combinaison de pressions du vent, de la poussée thermique et de la poussée de l'humidité. L'aménagement d'orifices en haut et en bas de la cavité assurera généralement l'essentiel de la ventilation. Une ventilation par pression motrice peut s'élever à environ 1 pascal. Le débit généré par une telle pression sera de l'ordre de 0,1 à 1 litre par seconde par m^2 et peut enlever de 10 à 1 000 g/m^2/jour d'humidité derrière l'écran, selon le milieu extérieur. La conception ou la rénovation de murs en fonction d'une ventilation peut fortement augmenter l'assèchement par ventilation.

Des tests grandeur nature ont montré que, pour des calculs de débit d'air uniforme ou de faible variance, des joints verticaux ouverts standard (de 10 mm sur 65 mm sur 90 mm de profondeur), dans des placages de maçonnerie peuvent être considérés comme des orifices ayant un coefficient de débit de 0,65 et un exposant de débit de 0,55. D'autres orifices suivent étroitement la loi de puissance. L'écoulement à travers les orifices est supérieur sous des pressions dynamiques de grande amplitude que sous des pressions statiques inférieures, mais le débit réel est difficile à prévoir avec des équations applicables à un débit d'orifice standard.

Toutes les pièces préfabriquées à encastrer dans des placages de maçonnerie et disponibles dans le commerce, sous des pressions statiques et dynamiques, ont largement diminué le débit. Celui-ci oscillait entre 1 et 15% de celui qui traversait un joint vertical ouvert.

6.2 Recommandations pour la construction

Il faut encourager la construction dans tous les murs à écran pare-pluie, mais spécialement ceux qui ont des écrans et des parois internes capables d'absorber l'humidité (maçonnerie, bois, etc.). L'accroissement de la ventilation est également l'un des moyens les plus simples et les plus efficaces d'augmenter le degré de modération de pression.

Dans les constructions à placage de maçonnerie, on recommande d'aménager une ventilation minimale, c'est-à-dire, un joint vertical ouvert tous les 600 mm d'entraxe, *en haut et en bas* d'une cavité de 2,5 m de hauteur ou 0,2 % de la surface murale. Pour réaliser d'importants avantages à la suite de la modération de pression et de l'assèchement par ventilation, il faut prévoir une surface d'orifice au moins trois fois plus grande que celle-ci (0,6 % de la surface murale). En laissant un joint horizontal ouvert, continu et protégé, au sommet de la cavité, plutôt que des joints

verticaux ouverts, on augmente le débit de ventilation de 30 à 45 % et l'on accroît le degré de modération de pression.

Les pièces préfabriquées à encastrer dans des murs en maçonnerie, actuellement disponibles dans le commerce, réduisent beaucoup le débit d'air, de sorte qu'il faut les éviter si l'on souhaite un assèchement par ventilation et une modération de pression. Il est recommandé de consacrer certains efforts à mettre au point des pièces préfabriquées à encastrer efficaces.

Pour que les cavités soient dégagées (ce qui favorise une bonne ventilation et facilite le drainage), la largeur minimale de la lame d'air doit être de 30 mm, et de préférence de 40 à 50 mm.

Dans les lieux où le climat est très humide, il faut envisager sérieusement l'usage de systèmes à panneaux à joints ouverts, bien drainés et ventilés, pour les murs extérieurs.

6.3 Recommandations pour d'autres recherches

D'autres recherches en laboratoire et sur place doivent être menées pour vérifier les prédictions théoriques et expérimentales en laboratoire, portant sur le potentiel d'assèchement de la ventilation.

Il est d'une importance cruciale de déterminer et de quantifier les plus importants mécanismes d'humidification (pluie, condensation) et d'assèchement (drainage, diffusion et évaporation, ventilation) dans les murs typiques à placage de brique, dans des conditions de service.

L'effet de l'orientation et du climat sur le potentiel de ventilation doit être examiné plus en profondeur. Les pressions spatio-temporelles exercées sur les enveloppes de bâtiments sont très importantes, à la fois pour la modération de pression et la ventilation.

Le mécanisme de ventilation dans les murs aux petits orifices (surtout le placage en vinyle) nécessite d'autres recherches.

Il faut envisager des niveaux minimum de ventilation pour les inclure dans les codes, après avoir effectué les recherches et démonstrations appropriées.

7. Références

[1] ANDERSON, J.M., et GILL, J.R. *Rainscreen Cladding*, CIRIA Building and Structural Design Report, London, Butterworths, 1988.

[2] BASKARAN, A. *Review of Design Guidelines for Pressure Equalized Rainscreen Walls*. Rapport interne n° 629, IRC/CNRC, Ottawa, mars 1992.

[3] INCULET, D.R. *Pressure-Equalization of Rain Screen Cladding*, thèse de maîtrise, Faculty of Engineering Science, University of Western Ontario, London, Canada, 1990.

[4] KRAMER, C., H.J. GERHARDT, F. JANSER. « Wind Loads on Porous Building Walls », *Proc. of Int. Conf. on Building Envelope Systems and Technology*, Singapour, 1994, pp. 473-478.

[5] GERHARDT, H.J., F. JANSER. « Wind Loads on Permeable Facades », *Invitational Seminar on Wind, Rain, and the Building Envelope*, University of Western Ontario, London, 16 et 17 mai 1994.

[6] *Brick Masonry Rain Screen Walls*. Technical Note No. 27 (révisée), Brick Institute of America, Reston (Virginie) août 1994.

[7] LIERSCH, K.W. *Belüftete Dach- und Wandkonstruktionen : Bauphysikalische Grundlagen des Wärme- und Feuchteschutzes*, Bauverlag, Berlin, 1981.

[8] LOHMEYER, G. *Praktische Bayphysik*, B.G. Teubner, Stuttgart, 1995.

[9] HENS, H. *Bouwfysica 1 : Warme- En Massatransport*, Louvain, Belgique, 1992.

[10] GUY, R.W. et T. STATHOPOULUS. « Mechanisms of Pressure Differences Across Building Facades », *First Annual Conference on Building Science*, London (Ont.), 4 et 5 mars 1982.

[11] POPP, W., E. MAYER, H. KÜNZEL. « Untersuchungen über die Belüftung des Luftraumes hinter vorgesetzten Fassadenbekleidung aus kleinformatigen Elementen », Fraunhofer Institut für Bauphysik, Forschungsbericht B Ho 22/80, avril 1980.

[12] MAYER, E., H. KÜNZEL. « Untersuchungen über die notwendige Hinterlüftung an Außenwandbekeidung aus großformatigen Bauteilen », Fraunhofer Institut für Bauphysik, Forschungsbericht B Ho 1/83, mars 1983.

[13] KÜNZEL, H., E. MAYER. « Untersuchung über die notwendige Hinterlüftung an Außenwandbekeidung aus großformatigen Bauteilen », Schriftenreihe Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen, und Städtebau, mars 1983.

[14] UVSLRKK, S. « The Importance of Wind Barriers for Insulated Wood Frame Constructions » *Proc. of Symposium and Day of Building Physics*, Lund University, 24 au 27 août 1987, Swedish Council for Building Research, 1988, pp. 262 à 267.

[15] SCHWARZ, B. « Witterungsbeansphruchung von Hochhausfassaden » HLH Bd. 24, Nr. 12, pp. 376 à 384, 1973.

[16] *Research of the Natural Ventilation Behind, and Condensation On, Trespa Volkern Facade Siding*, rapport E108-1, Akoestisch Advies Bureau Peutz & Associes B.V., Pays-Bas, janvier 1984.

[17] SANDIN, K. *Skalmurskonstruktionens fukt- och temperaturbetingelser*, rapport R43-1991 ByggforskningsrDdet, Stockholm, Suède, 1991.

[18] SANDIN, K. « Moisture Conditions in Cavity Walls With Wooden Framework », *Building Research and Information*, vol. 21, n° 4, 1993, pp. 235 à 238.

[19] SANDIN, K. « Temperature and Moisture Conditions in Cavity Walls » *CIB W67 Symposium on Energy Moisture and Climate in Buildings*, Rotterdam, Pays-Bas, 3 au 6 septembre 1990.

[20] KÜNZEL, H., E. MAYER. *Wärme- und Regenschutz bei zweischaligem Sichtmauerwerk mit Kerndämmung*, BMFT-Forschungbericht T84-191.

[21] JUNG, E. « Dauerstandverhalten von Verblendziegelmauerwerk unter Witterunsbeansphruchung und Auswirkungen von Kerndämm-Maßnahmen » *Baustoffindustrie*, n° 6, novembre 1985, pp. 185 à 188.

[22] HENS, H. *Buitenwandoplossingen voor de residentiële bouw :De Spouwmuur*, Laboratorium voor Bouwfysica, Université catholique de Louvain, Belgique, 1984.

[23] STREETER, V, E. WYLIE. *Fluid Mechanics*, 8e éd., McGraw-Hill, New York, 1985.

[24] BAKER, P.H., S. SHARPLES, I.C. WARD. « Air Flow Through Cracks », *Building & Environment*, Vol. 22, n° 4, 1987, pp. 293 à 304.

[25] ETHERIDGE, D.W. « Crack Flow Equations and Scale Effects », *Building & Environment*, vol. 12, 1977, pp. 181 à 189.

[26] KRONVALL, J. « Crack Flow. A Power Law Estimation Technique », *Proc. 12th AIVC Conference*, Ottawa, septembre 1991, pp. 261 à 269.

[27] LIDDAMENT, M.W. « Power Law Rules – OK? » *Air Infiltration Review*, vol. 8, n° 2, février 1987, pp. 4 à 6.

[28] ETHERIDGE, D.W. « The Rule of the Power Law – An Alternative View » *Correspondence in Air Infiltration Review*, vol. 8, n° 4, août 1987, pp. 4 et 5.

[29] *ASHRAE Handbook of Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta (Georgia) 1993.

[30] MILLER, R.W. *Flow Measurement Engineering Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1989.

[31] WHITE, F. *Viscous Fluid Flow*, 2e éd., McGraw-Hill, New York, 1991.

[32] LICHTAROWICZ, A., R.K. DUGGINS, E. MARKLAND. « Discharge Coefficients for Incompressible Non-Cavitating Flow Through Long Orifices », *J. Mechanical Engineering Science*, vol. 7, n° 2, 1965, pp. 210 à 219.

[33] DAILY, J.W., W.L. HANKEY, R.W. OLIVE, J.M. JORDAAN. « Resistance Coefficients for Accelerated and Decelerated Flows Through Smooth Tubes and Orifices », *Trans. Amer. Society of Mech. Engrs.*, juillet 1956, pp. 1071 à 1077.

[34] YAMAGUCHI, A. « Non-Steady Characteristics of Orifices » *Bulletin of J.S.M.E.*, vol. 19, n° 131, mai 1979, pp. 505 à 512.

[35] SKERLJ, P., D. SURRY. « A Study of the Mean Pressure Gradients, Mean Cavity Pressures, and Resulting Residual Mean Pressures across a Rainscreen for a Representative Building », rapport final BLWT-SS23-1994, Faculty of Engineering Science, University of Western Ontario, London, septembre 1994.

[36] LIN, J.X., D. SURRY, D.R. INCULET. « A Study of the Characteristic Shapes of Mean Pressures and Their Gradients on Buildings in Realistic Surroundings », rapport BLWT-SS3-1995, Faculty of Engineering Science, University of Western Ontario, London, mars 1995.

[37] DAVENPORT, A.G., et H.Y. HUI. *External and Internal Wind Pressures on Claddings of Buildings*, Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory, Univ. of Western Ontario, London, Canada, 1982. Tiré du 1989 ASHRAE Handbook of Fundamentals, p. 14.4.

[38] STATHOPOULOS, T. et M. DUMITRESCU-BRULOTTE. « Design Recommendations for Wind Loading on Buildings of Intermediate Height » *Revue canadienne du génie civil*, vol. 16, n° 6, 1989, pp. 910 à 916.

[39] HOLMES, H.D. *Wind Loads on Low-rise Buildings: The Structural and Environmental Effects of Wind Loadings on Buildings and Structures*, Faculty of Engineering, Moansh University, Melbourne, Australie, 1986, chap. 12. Tiré du 1989 ASHRAE Handbook of Fundamentals, p. 14.5.

[40] *Normales climatiques au Canada*, 1951-1980, volume 5 : Le vent, Environnement Canada, Service de l'environnement atmosphérique, Ottawa, 1982.

[41] LAWSON, T.V. *Wind Effects on Buildings*, volume 1 : Design Applications. Applied Science Publishers, London, 1980.

[42] AYNSLEY, R.M., W. MELBOURNE, et B.J. VICHERY. *Architectural Aerodynamics*, Applied Science Publishers, London, 1977, p. 98.

[43] CROMMELIN, R.D., E.M.H. VRINS. « Ventilation Through a Single Opening in a Scale Model », *Air Infiltration Review*, vol. 9, n° 3, mai 1989, pp. 11 à 13.

[44] RAO, J. et F. HAGHIGHAT. « Wind-Induced Fluctuating Airflow in Buildings », *Proc. 12th AIVC Conference*, Ottawa, septembre 1991, pp. 111 à 121.

[45] BROOK, M.S. « Rationalizing Wall Performance Criteria », *Proc. Sixth Conference on Building Science & Technology*, Toronto, 5 et 6 mars 1992, pp.145 à 161.

[46] GULAY, B.W., C.D. STEWART, et G.J. FOLEY. *Field Investigation Survey of Airtightness, Air Movement and Indoor Air Quality in High Rise Apartment Buildings*, rapport sommaire pour la Société canadienne d'hypothèques et de logement, Ottawa, Canada, 1993.

[47] KRONVALL, J. *Air Flows in Buildings Components*, thèse de doctorat, Lund University, Lund, Suède, 1980.

[48] HALL, C., W.D. HOFF, M.R. NIXON. « Water Movement in Porous Building Materials – VI. Evaporation and Drying in Brick and Block Materials », *Building & Environment*, vol. 19, n° 1, pp. 13 à 20, 1984.

[49] LACY, R.E. *Climate and Building in Britain*. HMSO, Londres, 1977.

[50] SCHWARZ, B. *Die Wärme und Stoffübertragung an Außenwandoberflächen*, thèse de doctorat, Universität Stuttgart, Fakulität für Bauwesen, Allemagne, 1978.

[51] WILSON, A. G. « Condensation in Insulated Masonry Walls in Summer », *RILEM/CIB Symposium*, Helsinki, 1965, pp. 2 à 7.

[52] TENWOLDE, A., M.T. MEI. « Moisture Movement in Walls in a Warm Humid Climate » *Proceedings of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings III*, Clearwater Beach (Floride) 2 au 5 déc. 1985, pp. 570 à 582.

[53] ANDERSEN, N.E. « Summer Condensation in an Unheated Building », *Proc. of Symposium and Day of Building Physics*, Lund University, 24 au 27 août 1987, Swedish Council for Building Research, 1988, pp. 164 et 165.

[54] LUIKOV, A.V. *Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Bodies*, Permagon Press, Oxford, 1965.

[55] INCROPERA, F.P. et D.P. DEWITT. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 2e éd., John Wiley & Sons, New York, 1985.

[56] CUNNINGHAM, M.J. « A New Analytical Approach to the Long Term Behaviour of Moisture Concentrations in Building Cavities – I. Non-Condensing Cavity », *Building & Environment*, vol. 18, n° 3, 1983, pp. 109 à 116.

[57] CUNNINGHAM, M.J. « A New Analytical Approach to the Long Term Behaviour of Moisture Concentrations in Building Cavities – II. Condensing Cavity », *Building & Environment*, vol. 18, n° 3, 1983, pp. 117 à 124.

[58] CUNNINGHAM, M.J. « Further Analytical Studies of Building Cavity Moisture Concentrations », *Building & Environment*, vol. 19, n° 1, 1984, pp. 21 à 29.

[59] BURCH, D., W.C. THOMAS, L.R. MATHENA, B.A. LICITRA, D.B. WARD. « Transient Moisture and Heat Transfer in Multi-Layer Non-Isothermal Walls–Comparison of Predicted and Measured Results », *Proceedings of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings IV*, Orlando (Floride) 4 au 7 déc. 1989.

[60] KERESTECIOGLU, A.A., P.W. FAIREY, S. CHANDRA. « Algorithms to Predict Detailed Moisture Effects in Buildings », *Proceedings of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings III*, Clearwater Beach (Floride) 2 au 5 déc. 1985.

[61] KAYS, W.M., et M.E. CRAWFORD. *Convective Heat and Mass Transfer*, McGraw-Hill, New York, 1980.

[62] WOLF, H. *Heat Transfer*, Harper and Row, New York, 1983.

[63] *Condensation*, Building Research Establishment Digest No. 110, HMSO, Londres, 1972.

[64] *British Standard 5250: 1989 Control of Condensation in Buildings*, British Standards Institute, Londres, 1989.

Annexe A

Évaluation de l'assèchement par ventilation : un exemple de conception

Voici un exemple pour indiquer comment l'information présentée dans notre rapport peut servir à prédire l'assèchement potentiel par ventilation dans les bâtiments.

L'exemple est celui d'un immeuble d'appartements de dix étages à placage de brique, dont les dimensions sont celles de la figure A.1, et qui est situé à Waterloo (Ontario). Selon la procédure d'évaluation de la ventilation présentée plus tôt dans la figure 5.8, on peut énumérer les données suivantes :

A. Définir les caractéristiques des murs

1. Espacement vertical des orifices : 2,5 m
2. Espacement horizontal des orifices : 600 mm
3. Chaque joint vertical est laissé ouvert en haut et en bas
4. Profondeur de la cavité : 50 mm
5. Type de cavité : déflexion partielle par le mortier
6. Lieu : Waterloo (Ontario), mur sud
7. Taille du bâtiment : 25 m de hauteur, 75 m de longueur, 20 m de profondeur
8. Le coin supérieur (c'est-à-dire, celui qui devient le plus humide à cause de la pluie et de l'exfiltration par effet cheminée)

B. Quantifier les forces motrices

1. Effets thermiques

À cause de l'énergie solaire conservée, le placage de brique dans un mur isolé demeure à une température d'au moins 5 °C au-dessus de la température ambiante, en toutes saisons.
À partir d'une interpolation du tableau 3.1, de la figure 3.2 ou de l'équation

$$\Delta P = 3\,465 \cdot \Delta h \left(\frac{1}{\Delta T_{out}} - \frac{1}{T_{cav}}\right)$$

on peut évaluer à environ 0,5 pascal le débit moyen à long terme attribuable à la pression.

2. Effets du vent

Selon les données des Services atmosphériques, la vitesse horaire moyenne du vent provenant de la direction ouest-sud-ouest et soufflant vers ls direction est-sud-est oscille entre un niveau immédiatement supérieur à 3 m/s et environ 4,5 m/s à la hauteur de référence de 10 m au-dessus du niveau du sol. Pour tenir compte de la hauteur de l'immeuble, il faut modifier la vitesse comme suit :

$$V_{25} = (25,10)^{0,1} \cdot V_{10}$$

$$= 1,1 \cdot 2,9 = 3,2 \text{ m/s (vents du sud-est)}$$

$$= 1,1 \cdot 4,5 = 4,9 \text{ m/s (vents du sud-ouest)}$$

Cette gamme de vitesses moyennes du vent se traduit par une pression de stagnation de 0,647 • V2 ou de 6,7 à 15,5 pascals.

Selon la figure 3.9, les gradients de ventilation établis à l'échelle à partir du bâtiment seraient d'environ 0,1 à partir du bas jusqu'en haut de la cavité, et peut-être de 0,2 horizontalement. Ces valeurs engloberaient une gamme étendue de directions du vent. Par conséquent, les pressions de ventilation attribuables au vent se situeraient entre environ 0,7 et 1,5 pascal par rapport à la hauteur de la cavité de 2,5 m, et entre 1,5 et 3,0 pascal, entre les portes panoramiques coulissantes sur les balcons (disons de 6 m).

Les variations dynamiques de la vitesse et des températures du vent signifient que l'envergure et la direction changeront énormément, mais les valeurs moyennes ci-dessus suggèrent que l'on peut s'attendre, de façon réaliste, à une pression de ventilation verticale moyenne de 1 à 2 pascals.

A. Quantifier la résistance au débit et le débit

La résistance au débit pour un système ayant des orifices similaires en haut et en bas de la cavité peut se calculer à partir de l'équation suivante :

$$\Delta P_{motrice} = 2 \cdot \Delta P_{orifice} + \Delta P_{cavité} = 2 \cdot \left(\frac{Q}{A_{orifice}}\right)^2 + \frac{Q \cdot H}{4\,610 \cdot \gamma \cdot B \cdot D^3}$$

ou, pour cette exemple, en utilisant une cavité à blocage modéré, $\gamma = 0,5$:

$$\Delta P_{motrice} = 2 \cdot \left(\frac{Q}{0,62 \cdot 0,01 \cdot 0,066}\right)^2 + \frac{Q \cdot 2,5}{4\,610 \cdot 0,5 \cdot 0,6 \cdot 0,5^3}$$

Pour un débit de 3 x 10^{-4} m^3/s (0,3 l/s), la résistance serait de 1,0 pascal. Pour un débit de 4,1 x 10^{-4} m^3/s (0,41 l/s), elle serait de 2,0 pascals. Par conséquent, le débit devrait se situer entre 0,3 et 0,4 l/s par 0,6 m de largeur du mur, ou environ 0,2 ou 0,3 $l/s/m^2$.

B. Quantifier l'effet d'assèchement

À partir de la table 5.1, on constate clairement que les débits prédits diminueraient la résistance efficace à la vapeur de la brique, selon un facteur de 30 à 40. Cette réduction de la perméance à la vapeur des briques augmentera nettement l'assèchement de la paroi interne, si celle-ci est humidifiée par la pluie, la condensation, etc.

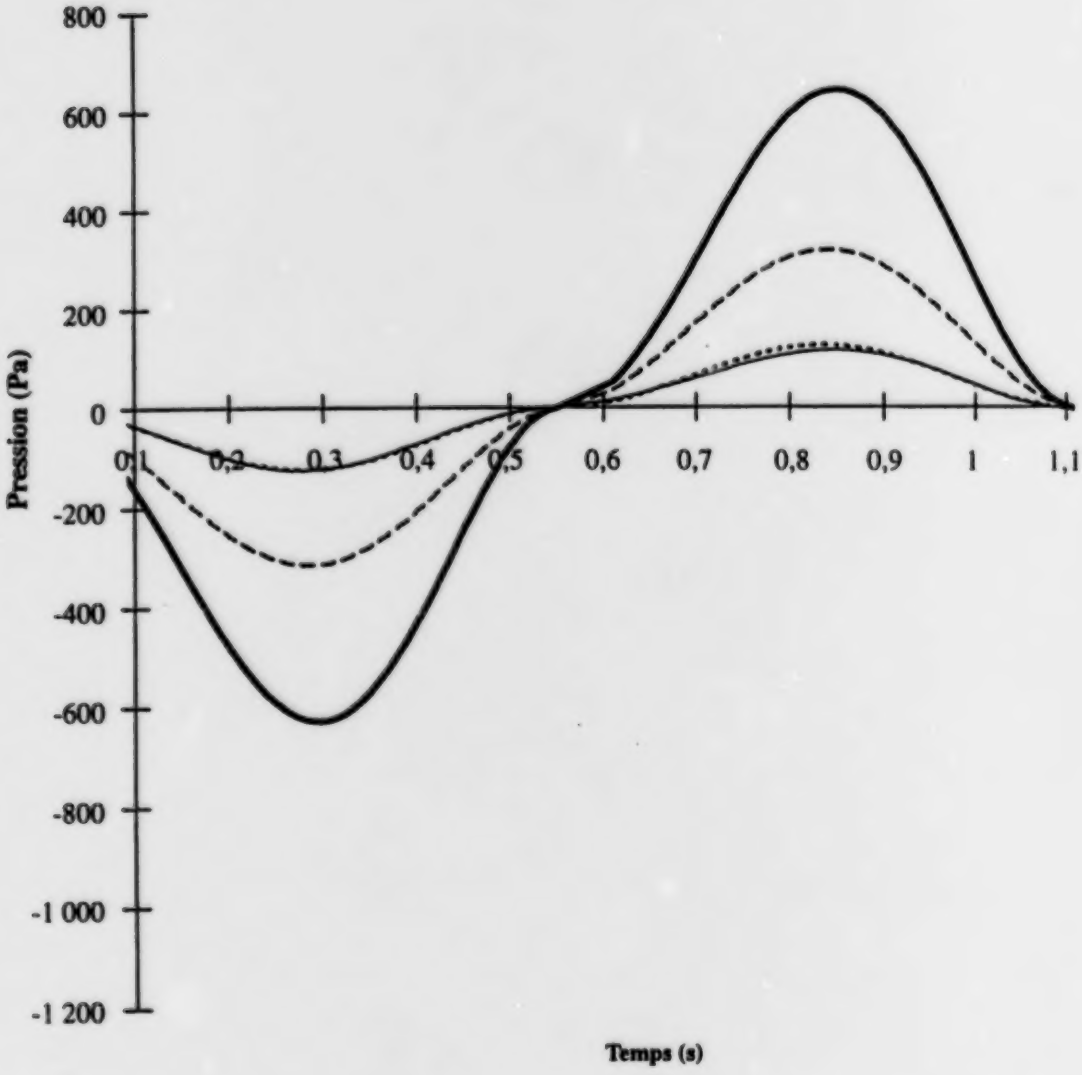
La figure 5.7 suggère que, pour les conditions de Waterloo, un débit de 0,2 $l/s/m^2$ entraînerait un potentiel d'assèchement de 100 à 150 g/m^2/jour en mai (c'est-à-dire, une période de pluies de printemps) et jusqu'à 200 g/m^2/jour en juillet. Bien que ces taux d'assèchement puissent sembler très faibles, ils seraient bénéfiques, parce que fondés sur des valeurs moyennes à long terme.

Si l'on juge nécessaire d'établir des taux supérieurs d'assèchement pour maintenir l'humidité de la brique ou de la paroi interne à des niveaux faibles, on peut laisser ouverts tous les joints verticaux en bas. Cela triplerait le débit de ventilation à un niveau de 0,6 à 0,9 $l/s/m^2$, quadruplerait le taux d'assèchement en mai en le portant à de 400 à 600 g/m^2/jour et assurerait un taux d'assèchement potentiel d'au moins 100 g/jour, même en janvier.

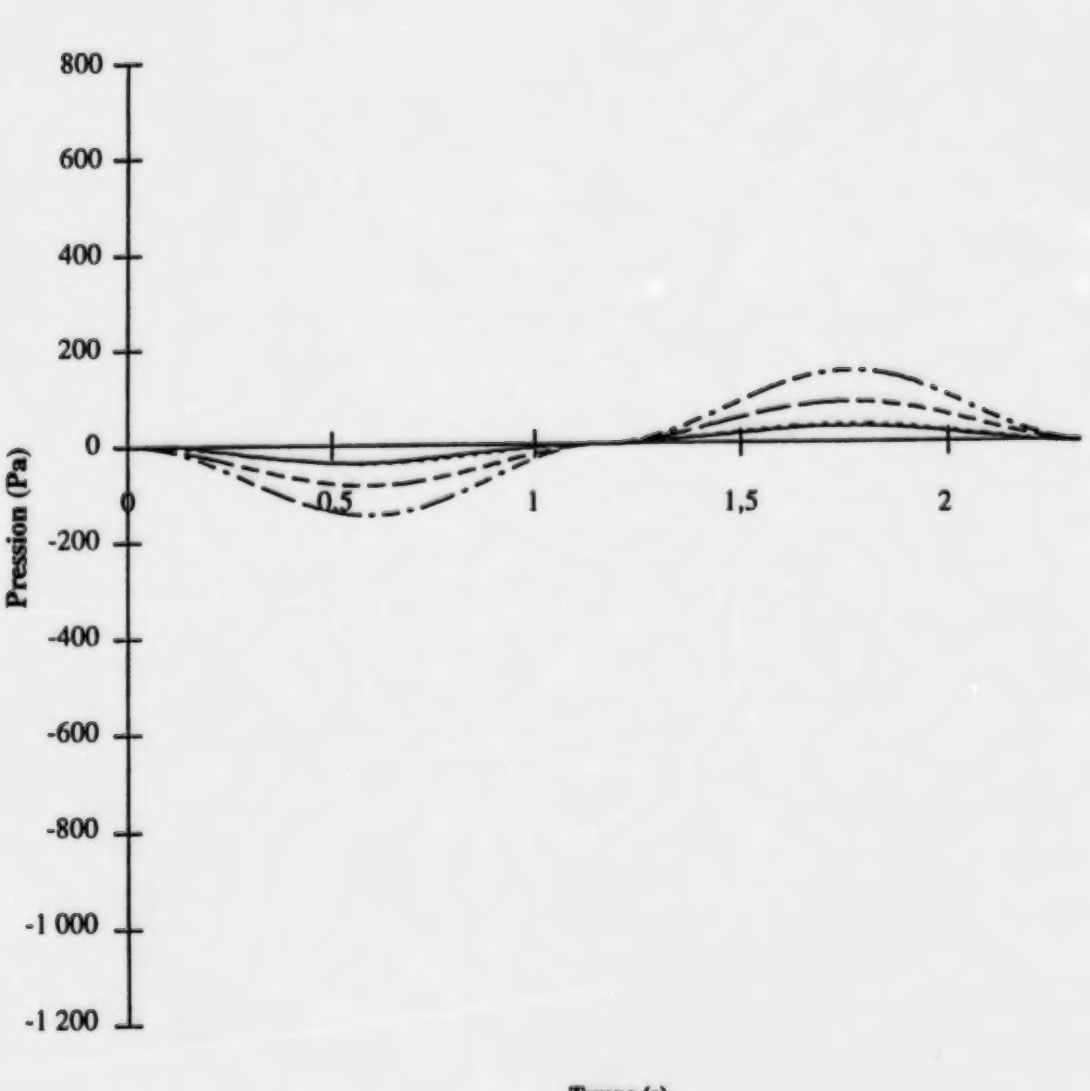
Annexe B

Résultats de certains tests relatifs à la pression statique et dynamique dans les orifices de ventilation

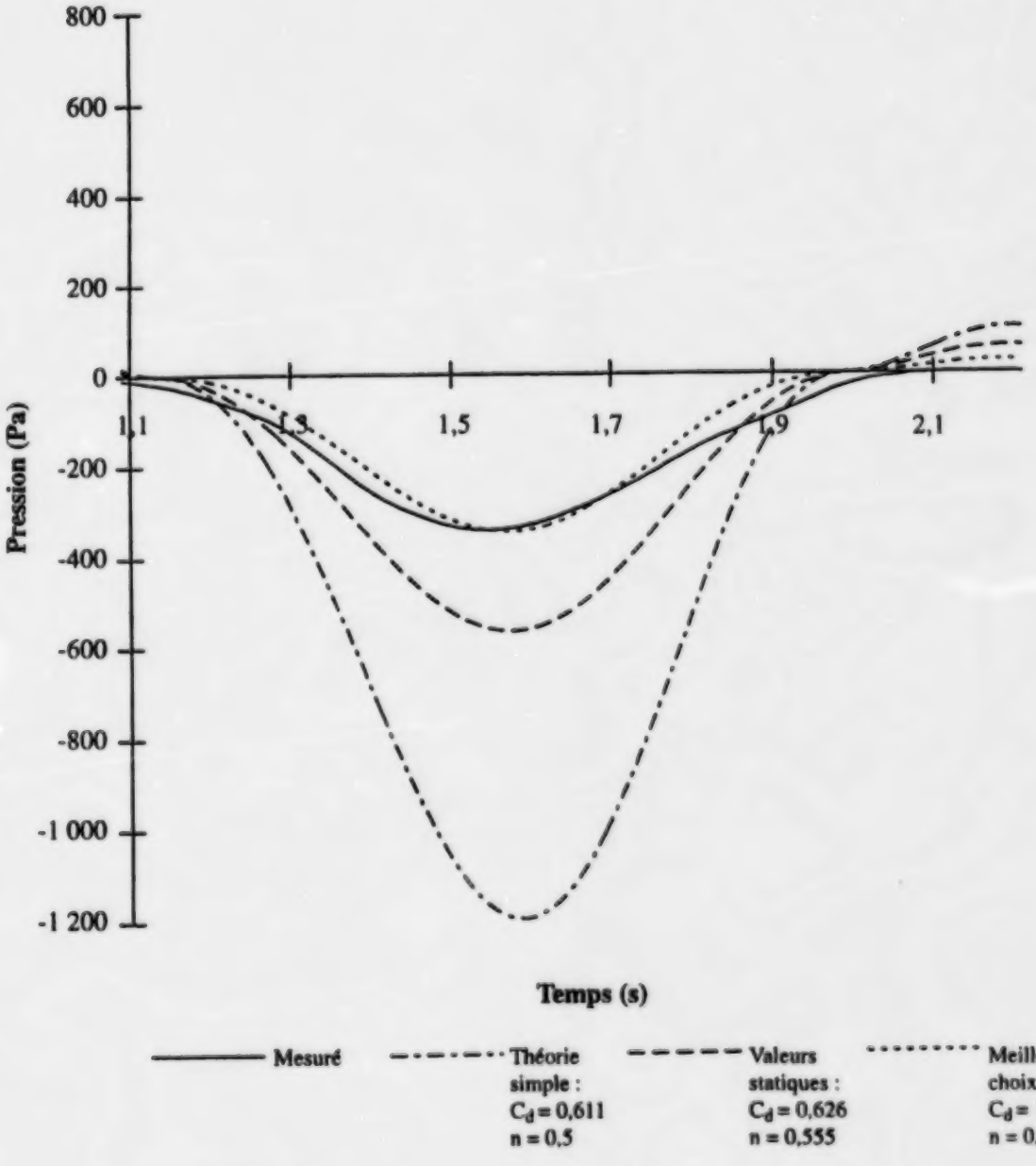
Orifice ouvert : période = 1,1 s, aucune pression appliquée



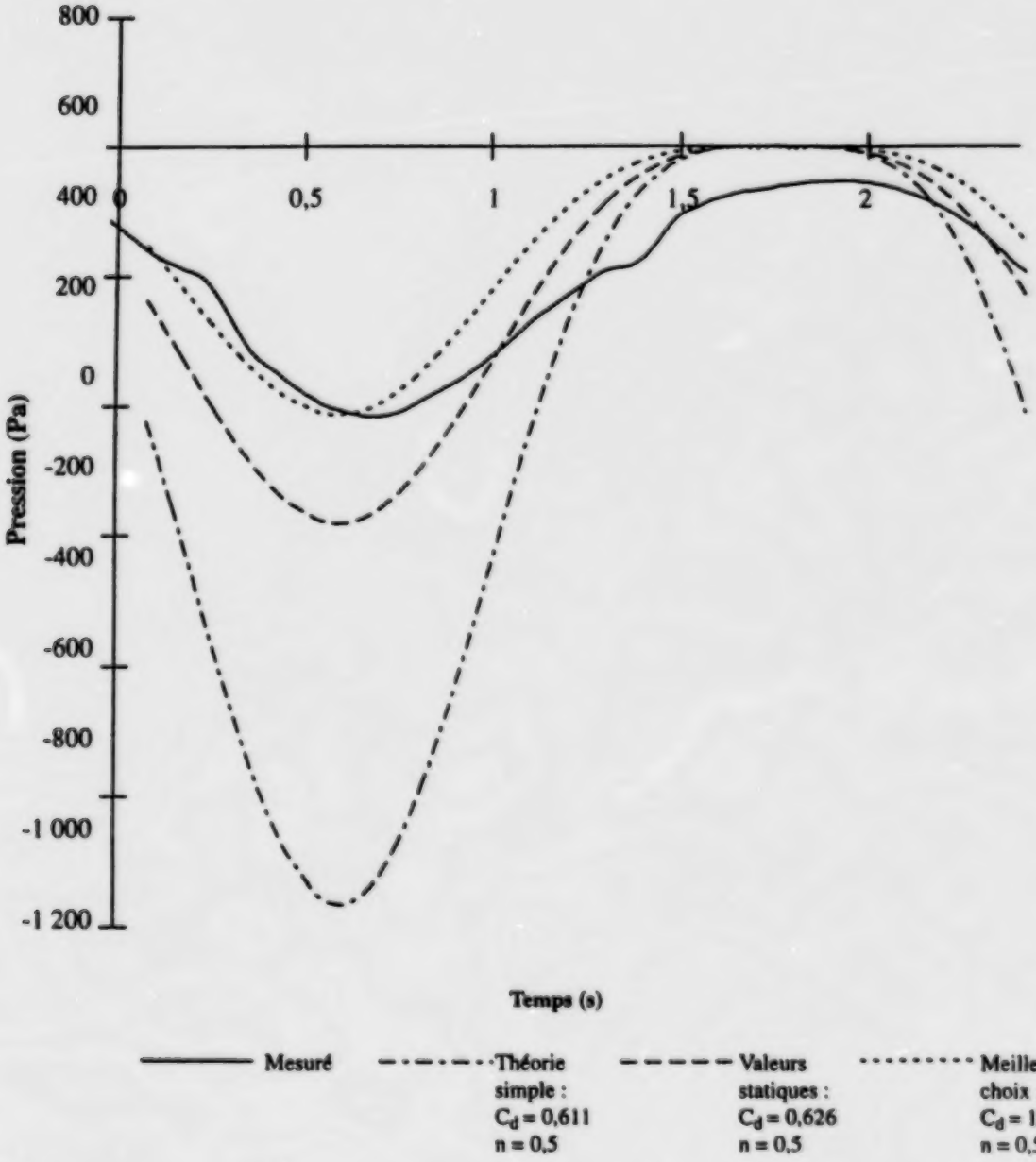
Orifice ouvert : période = 2,3 s, aucune pression appliquée



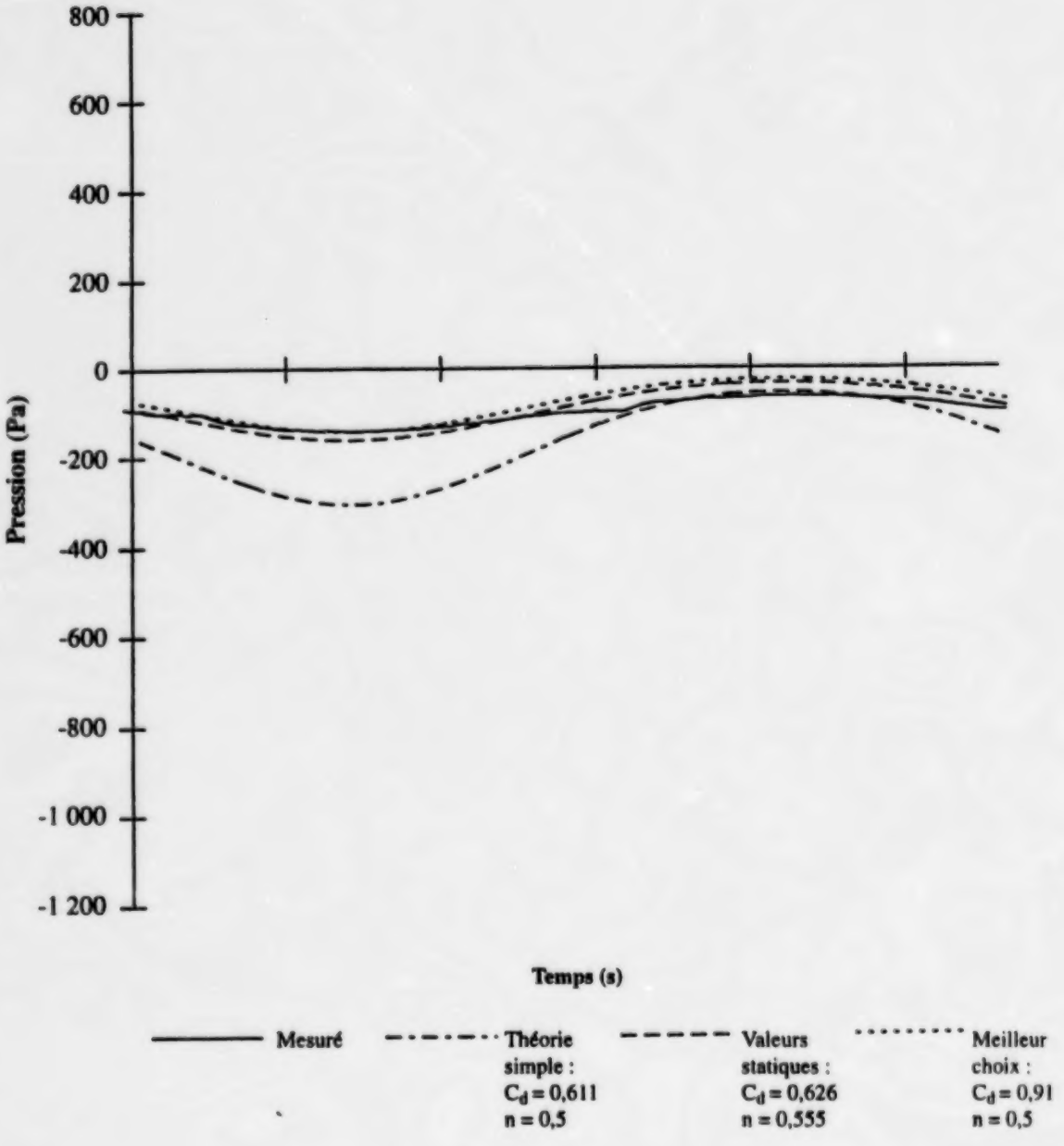
Orifice ouvert : période = 1,1 s, pression appliquée de –100 Pa



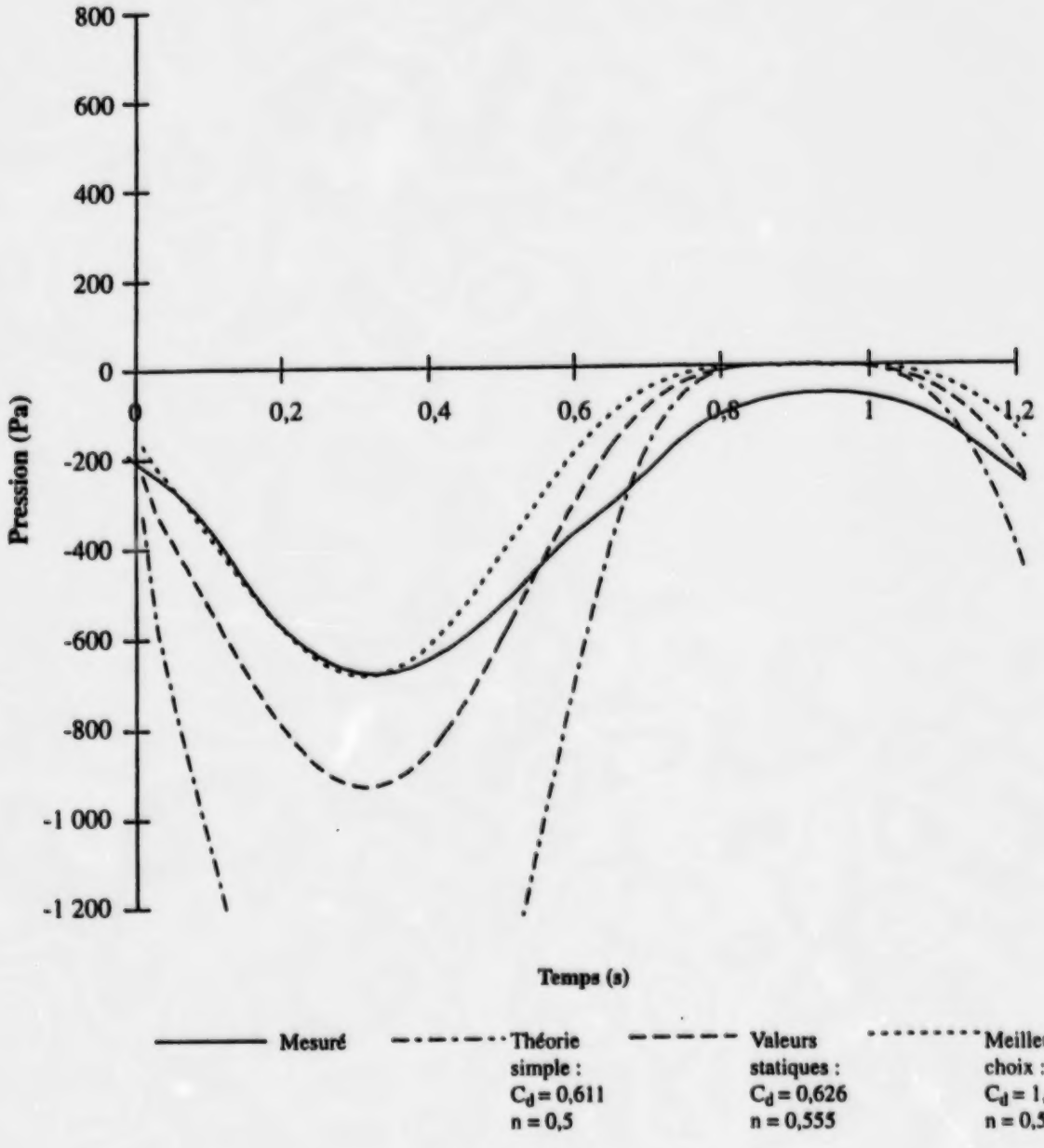
Orifice ouvert : période = 2,4 s, pression appliquée de –100 Pa



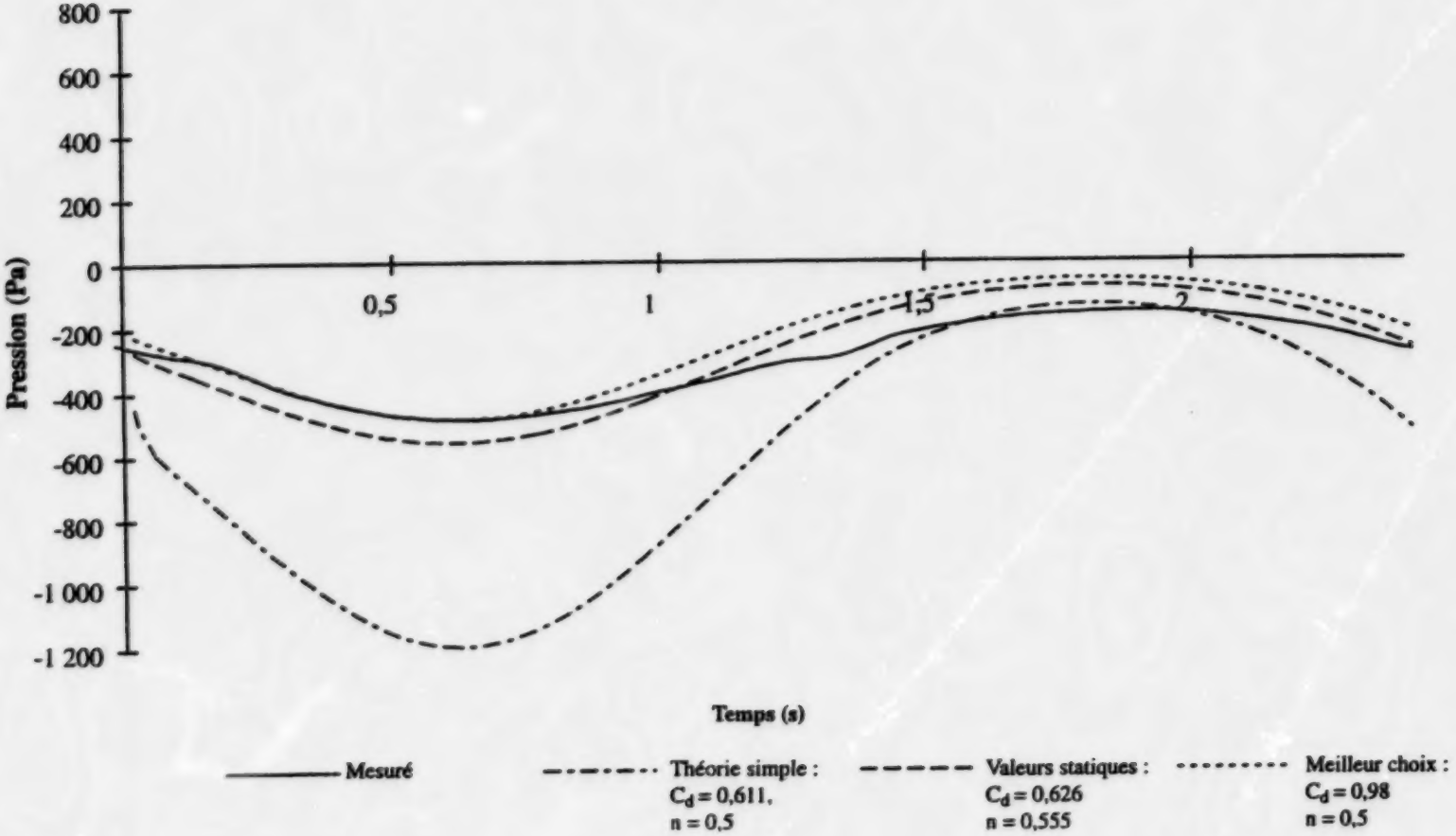
Orifice ouvert : période = 5,6 s, pression appliquée de –100 Pa



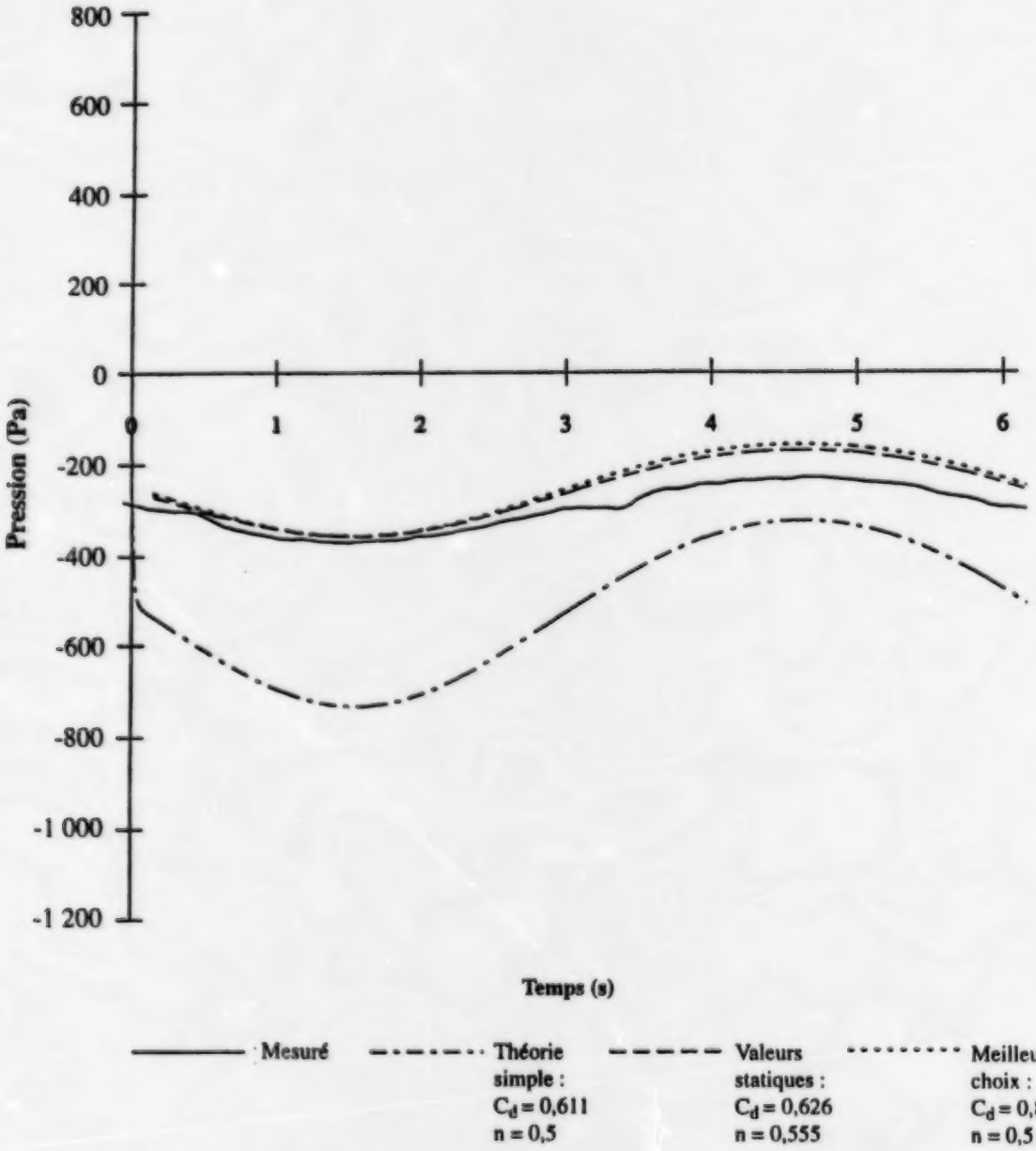
Orifice ouvert : période = 1,2 s, pression appliquée de –300 Pa



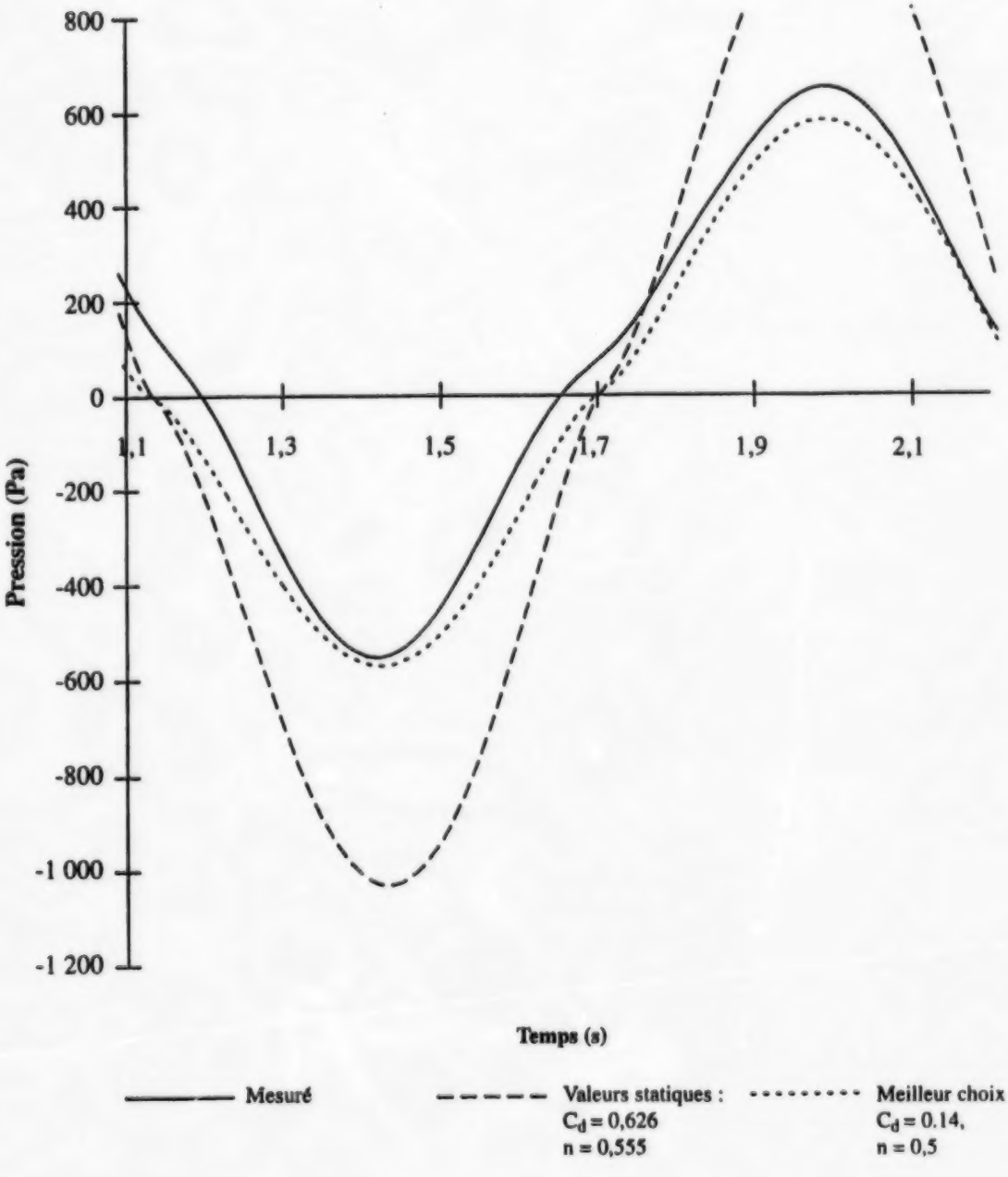
Orifice ouvert : période = 2,4 s, pression appliquée de –300 Pa



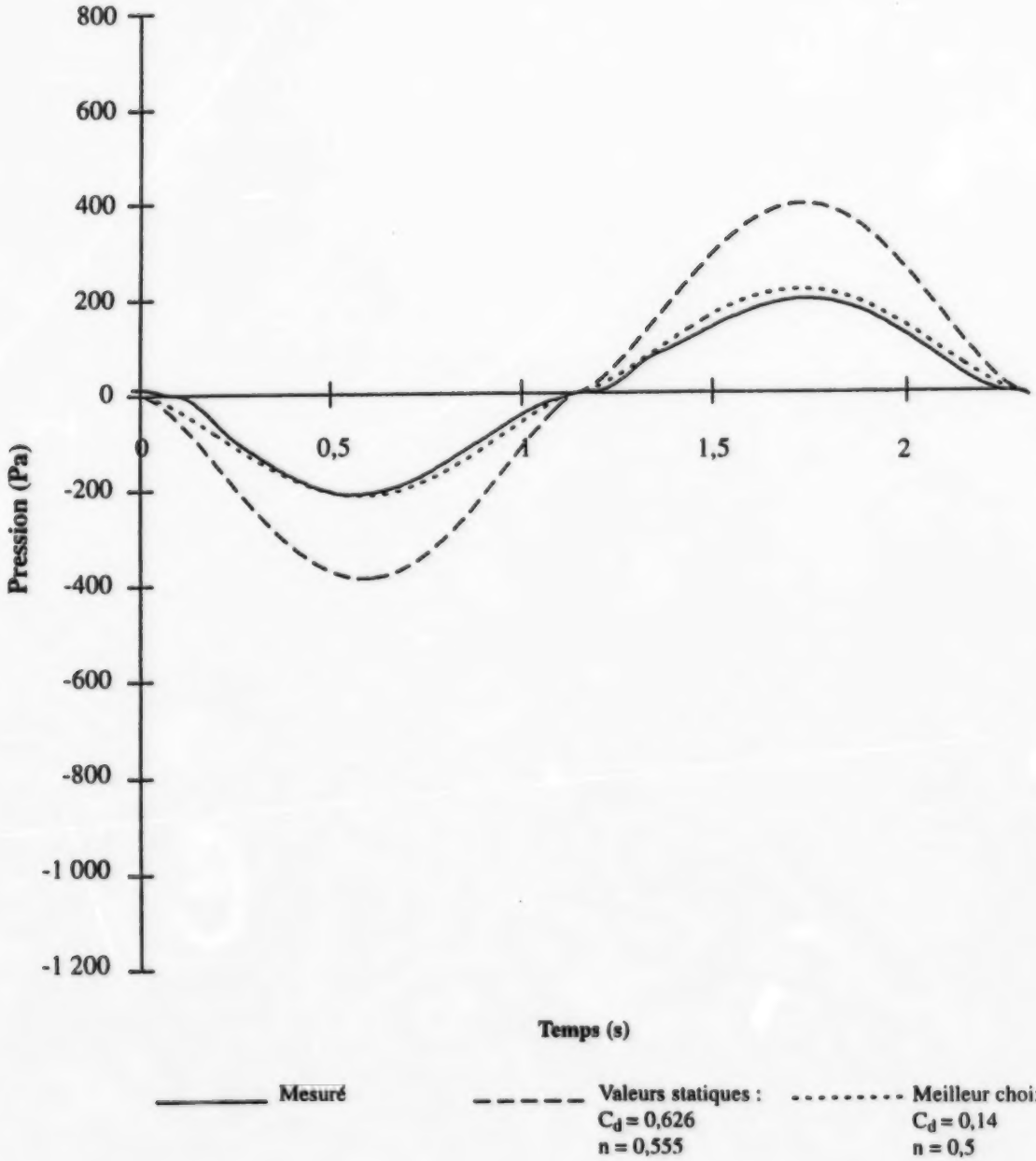
Orifice ouvert : période = 6,1 s, pression appliquée de –300 Pa



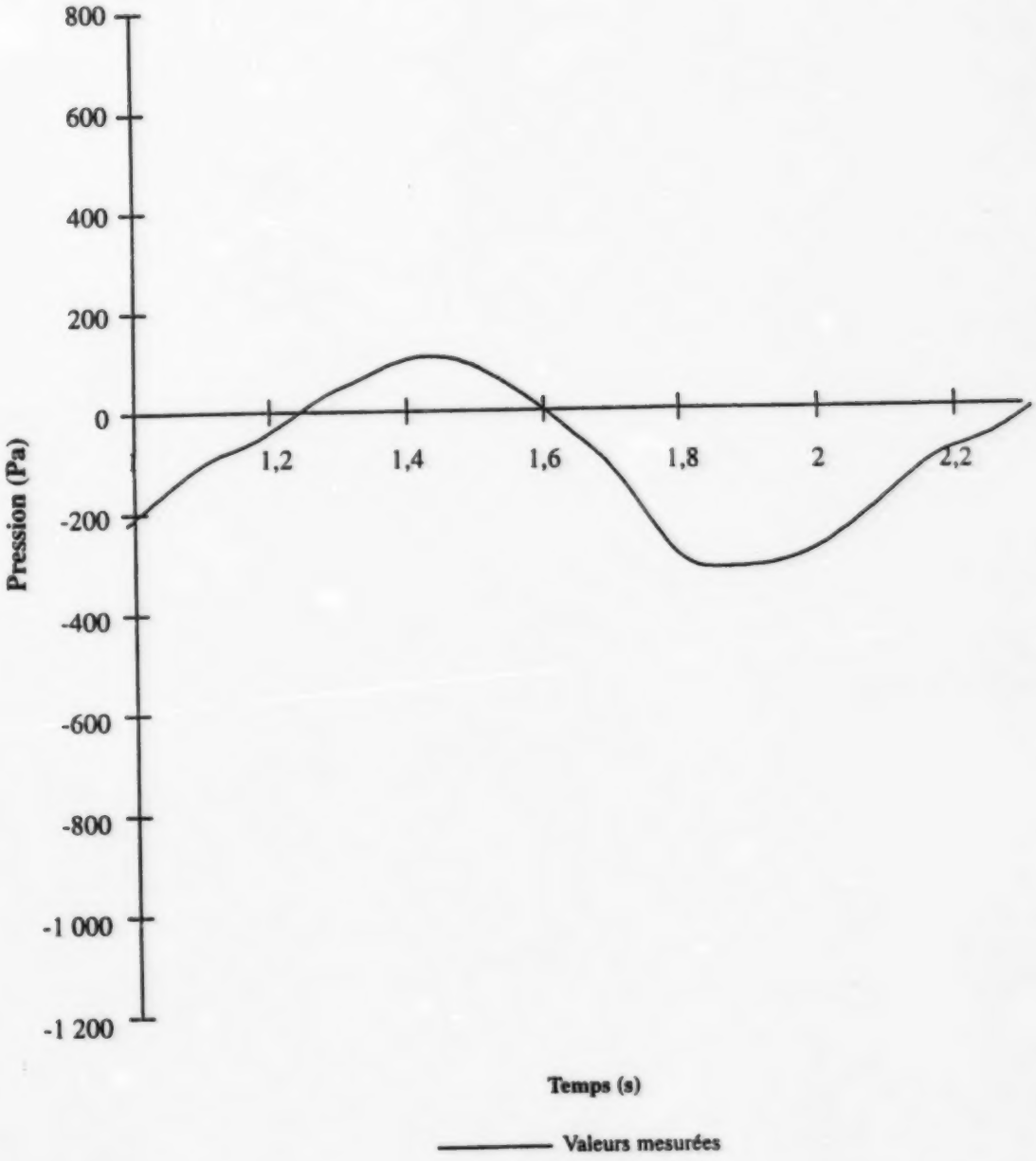
Cell-Vent : période = 1,1 s, aucune pression appliquée



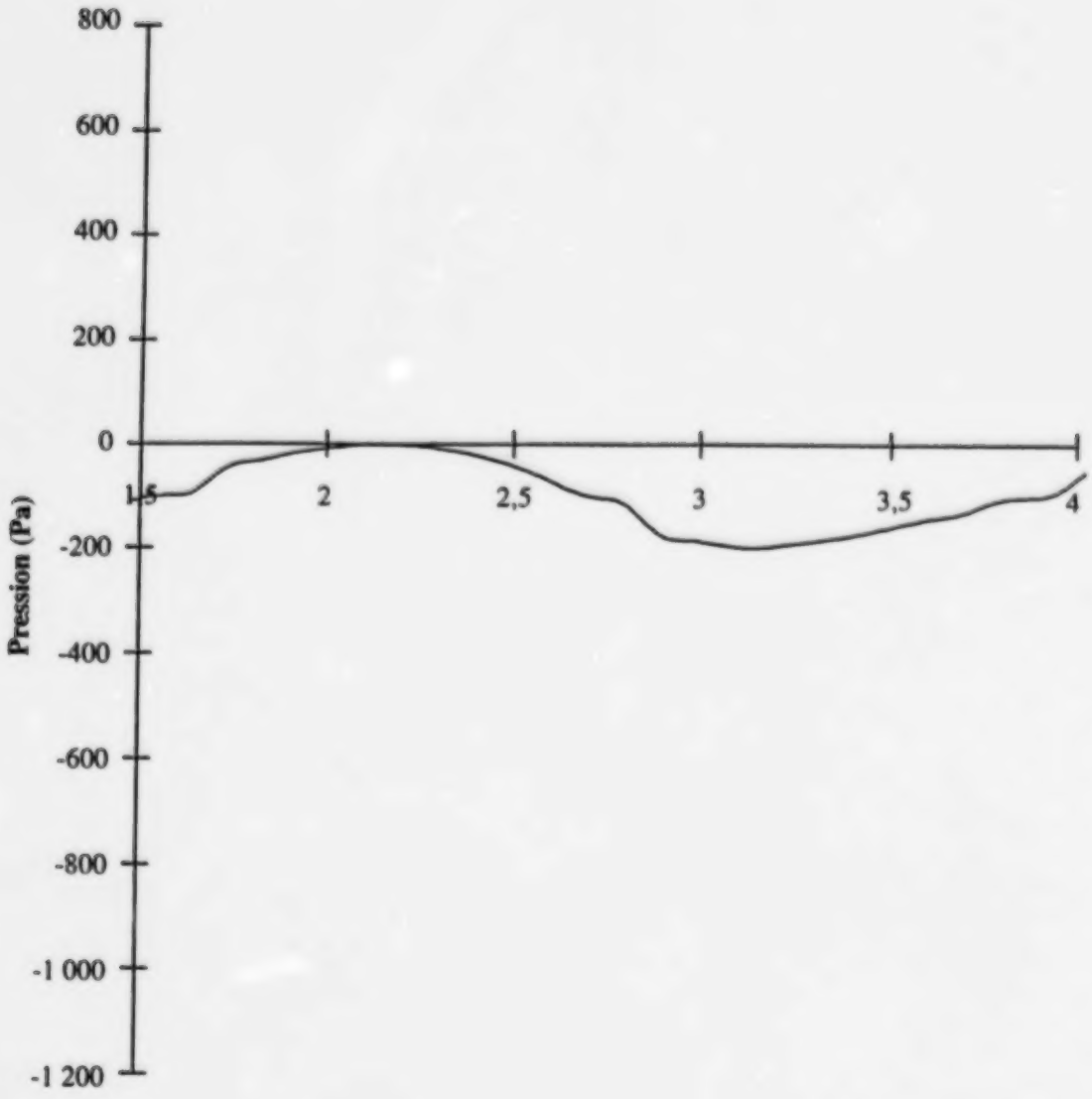
Cell-Vent : période = 2,3 s, aucune pression appliquée



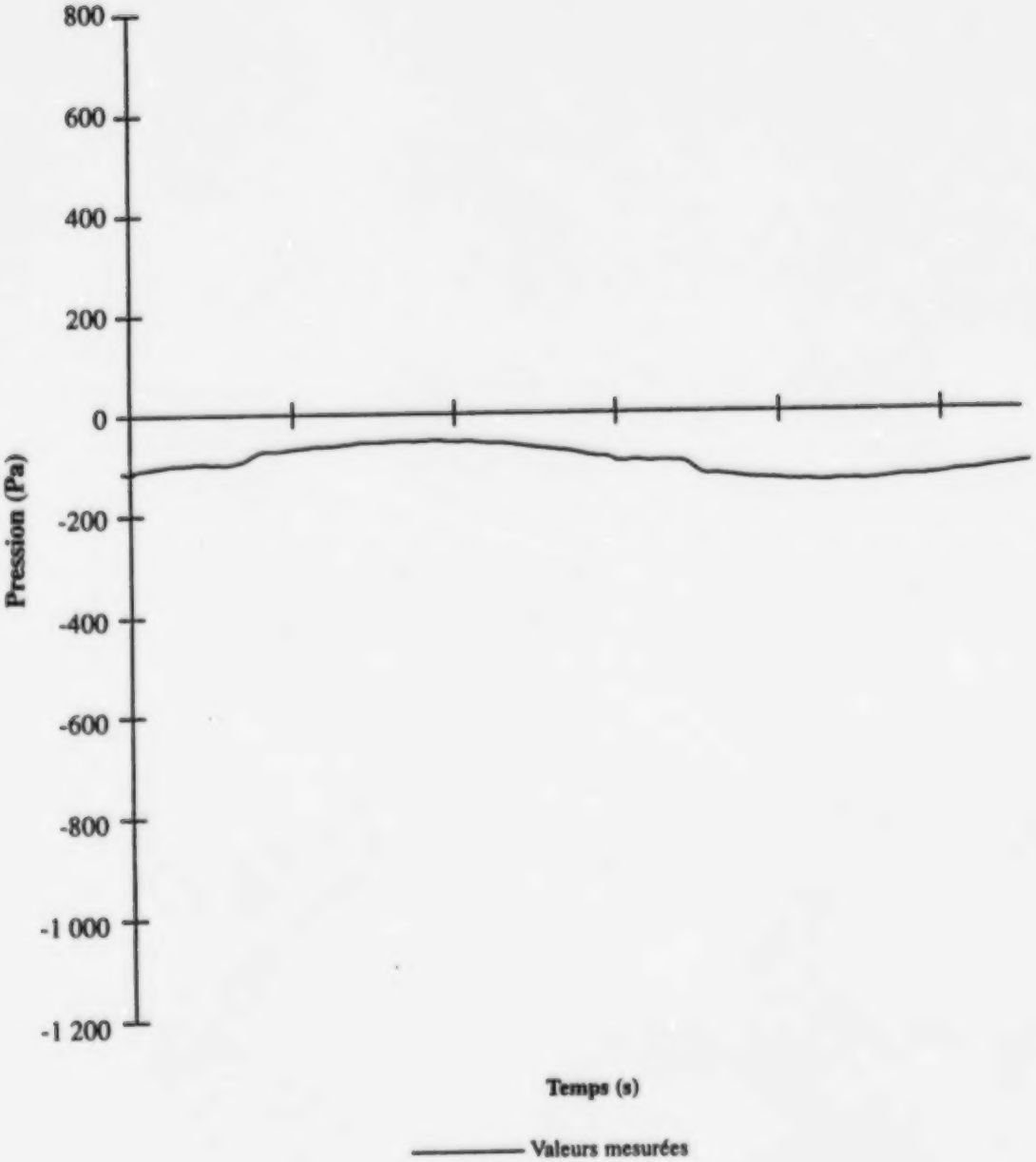
Cell-Vent : période = 1,1 s, pression appliquée de –100 Pa



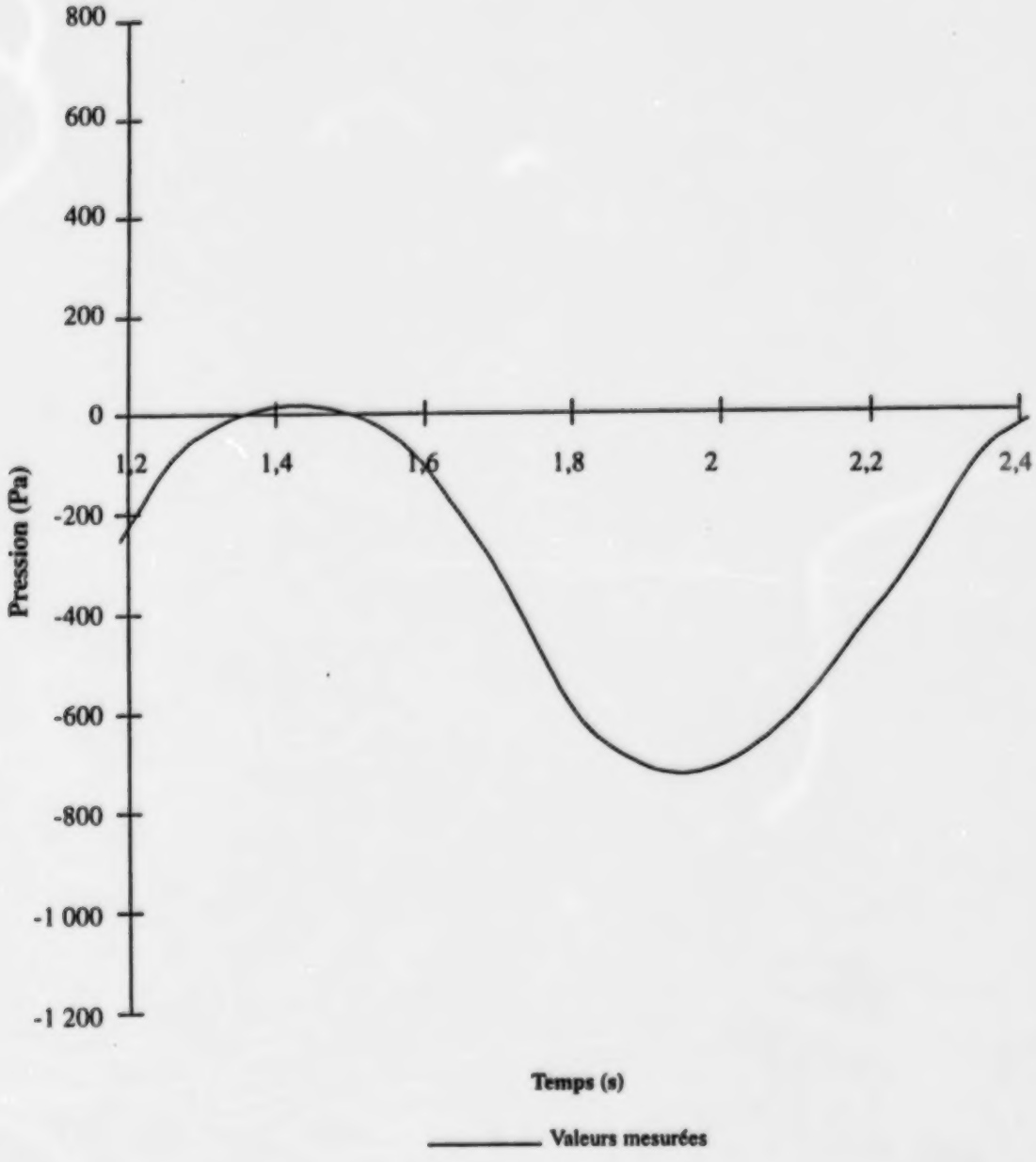
Cell-Vent : période = 2,4 s, pression appliquée de –100 Pa



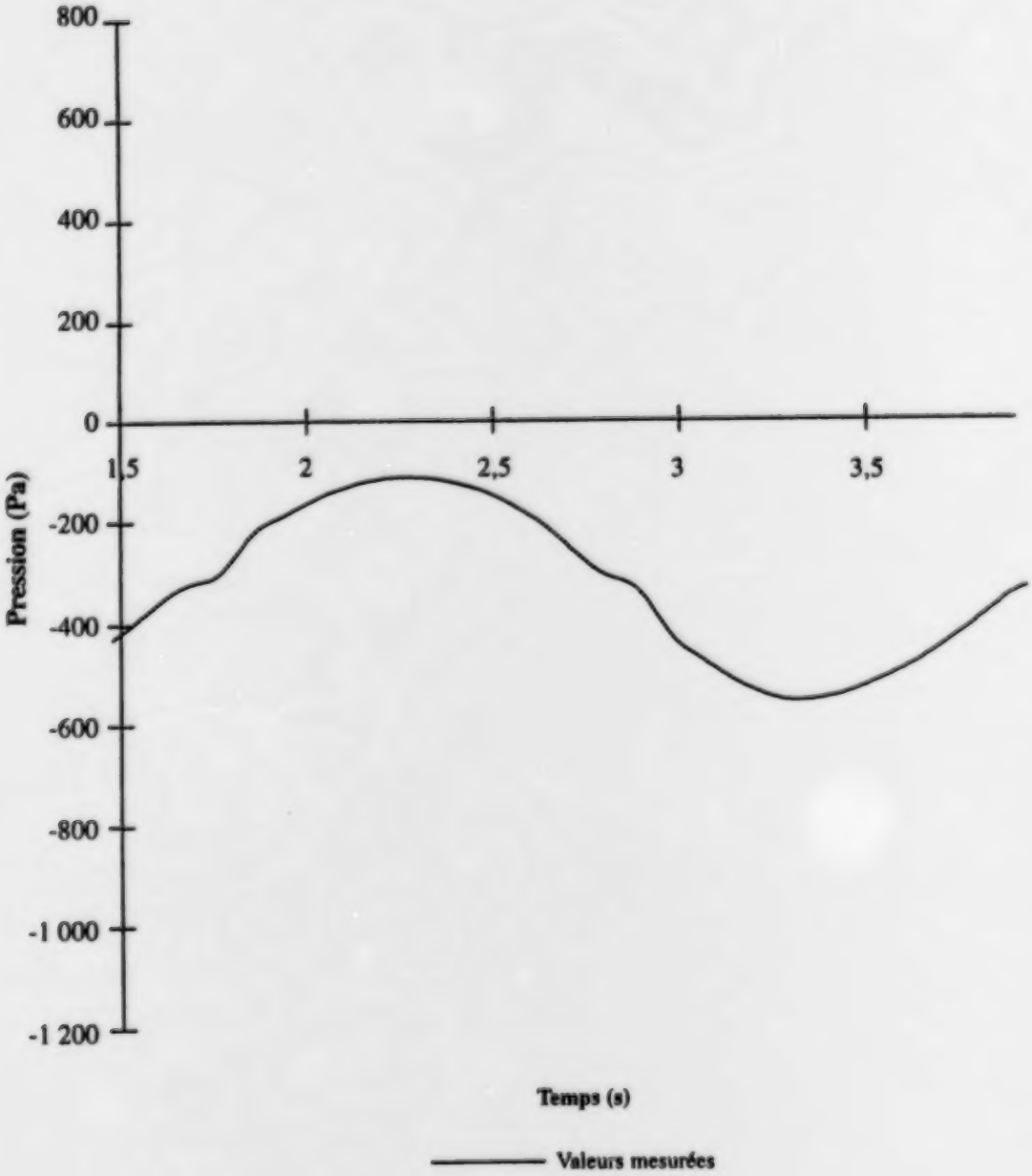
Cell-Vent : période = 5,2 s, pression appliquée de –100 Pa



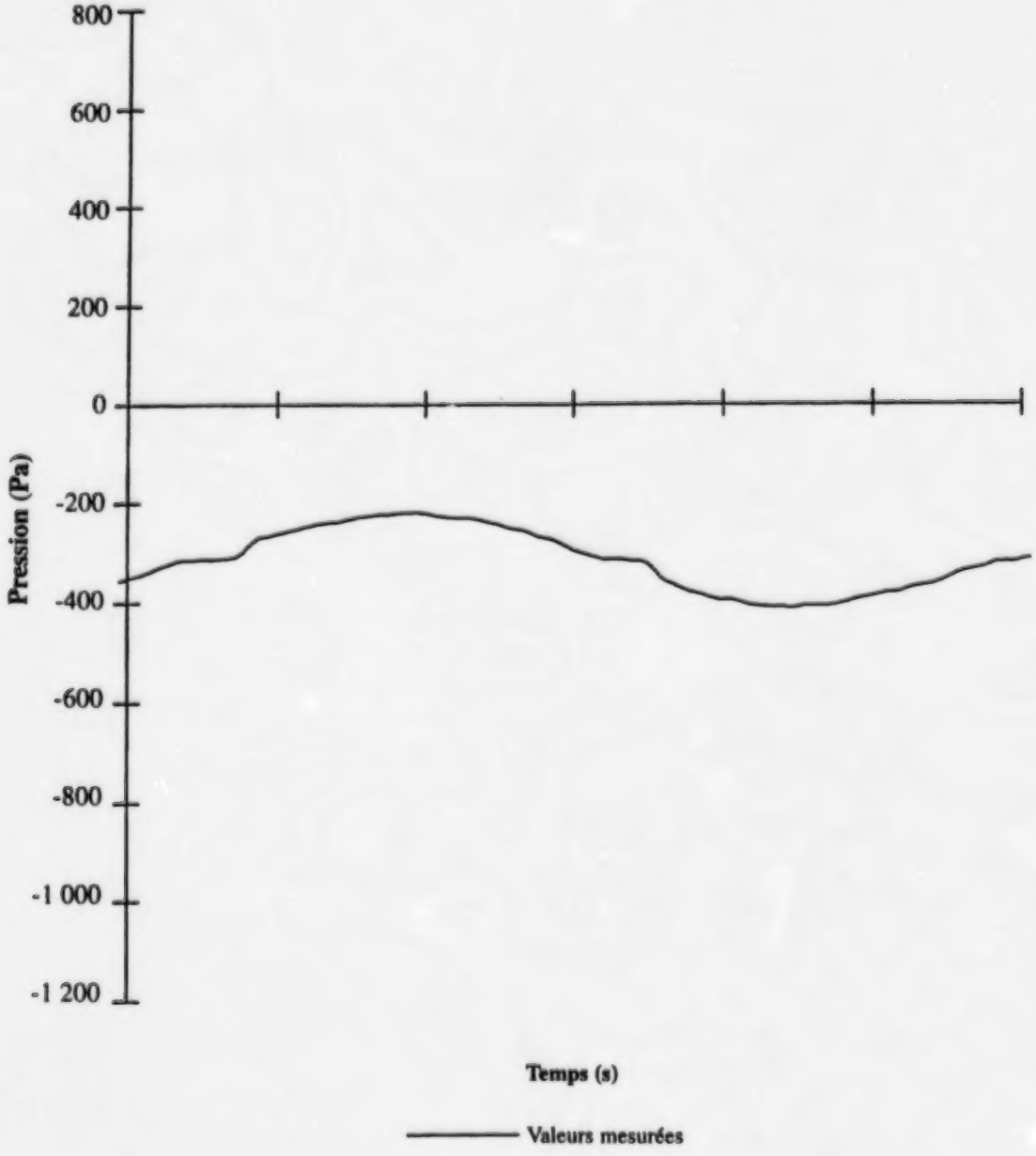
Cell-Vent : période = 1,2 s, pression appliquée de –309 Pa



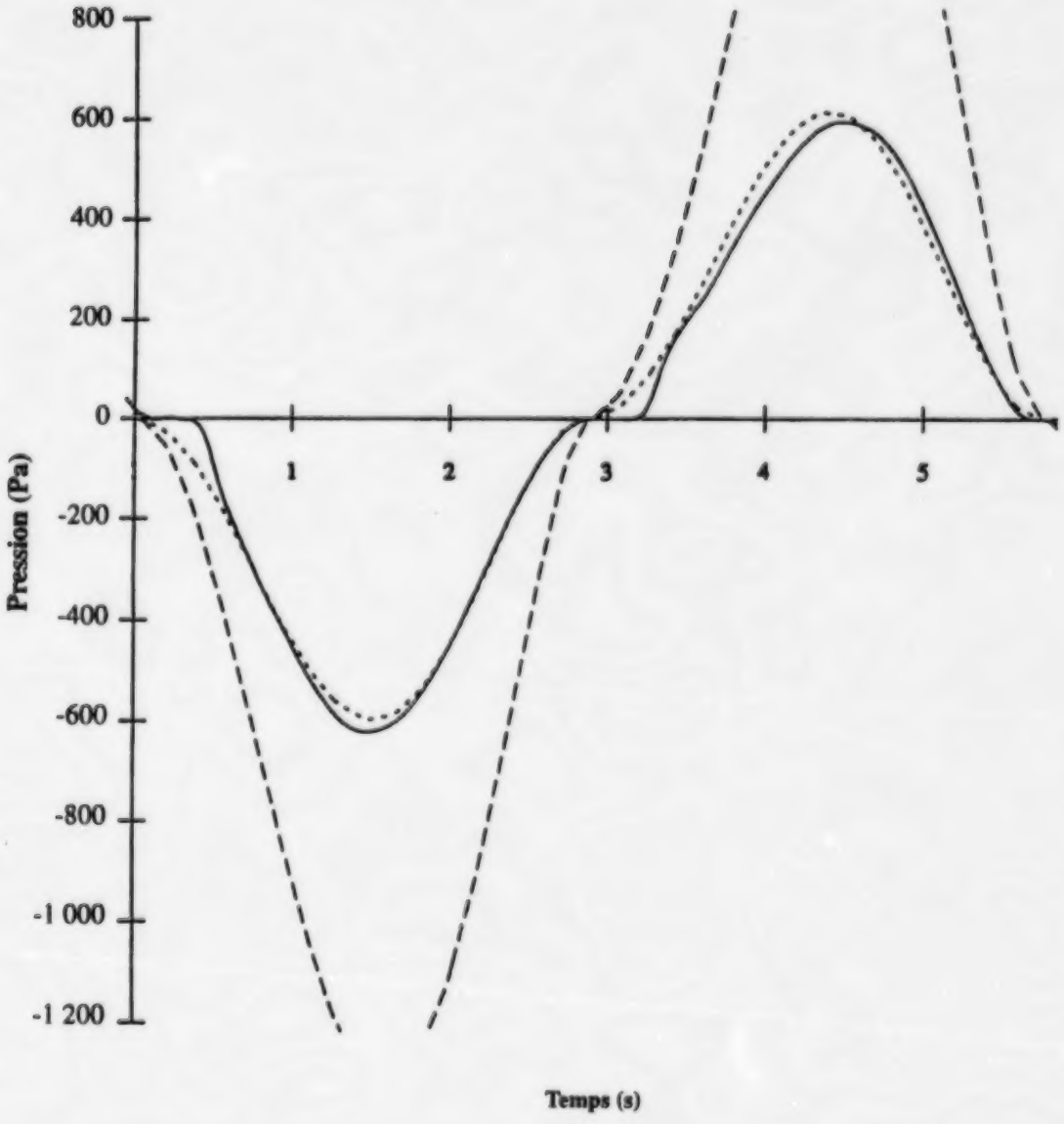
Cell-Vent : période = 2,3 s, pression appliquée de –319 Pa



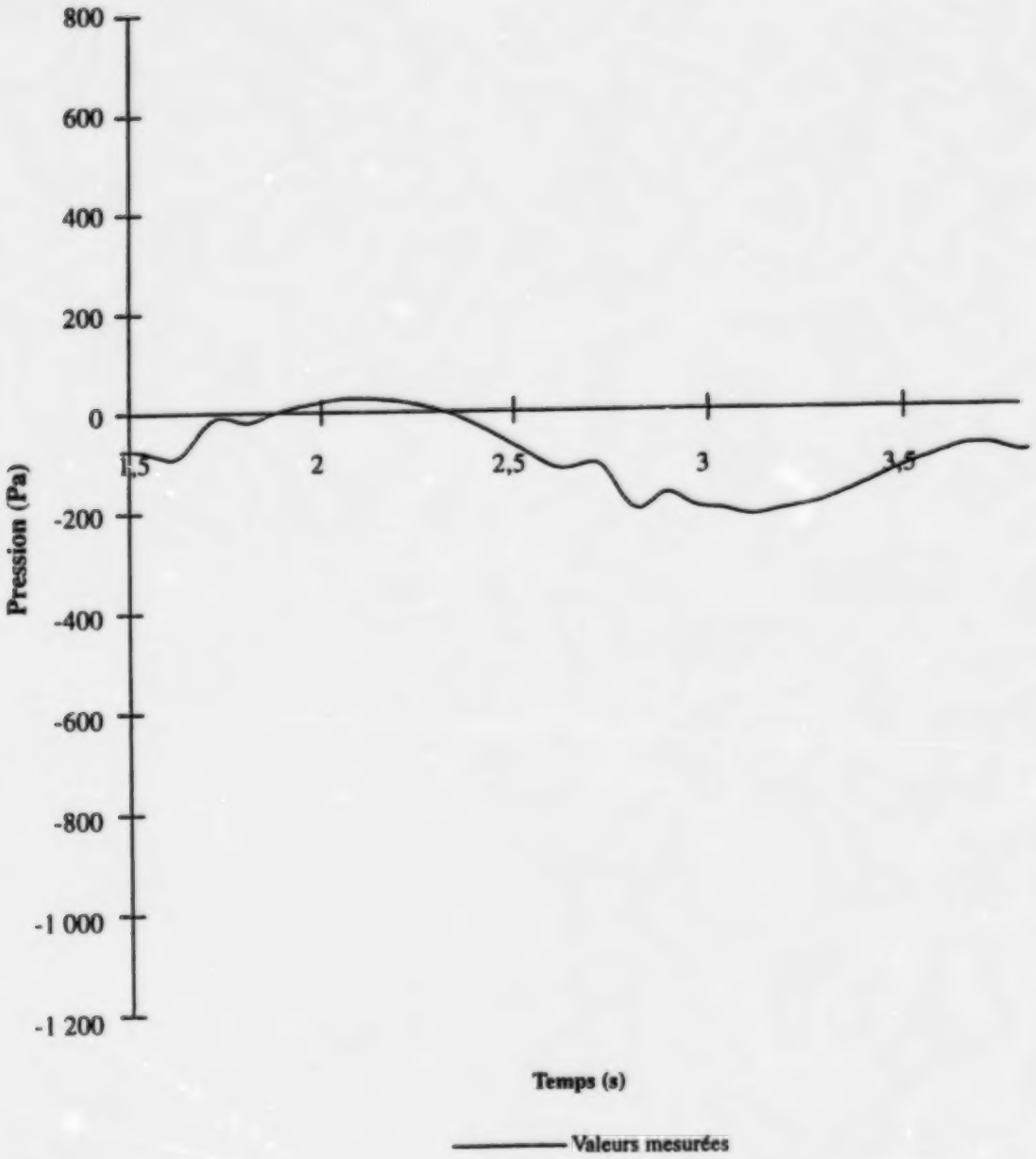
Cell-Vent : période = 5,7 s, pression appliquée de –315 Pa



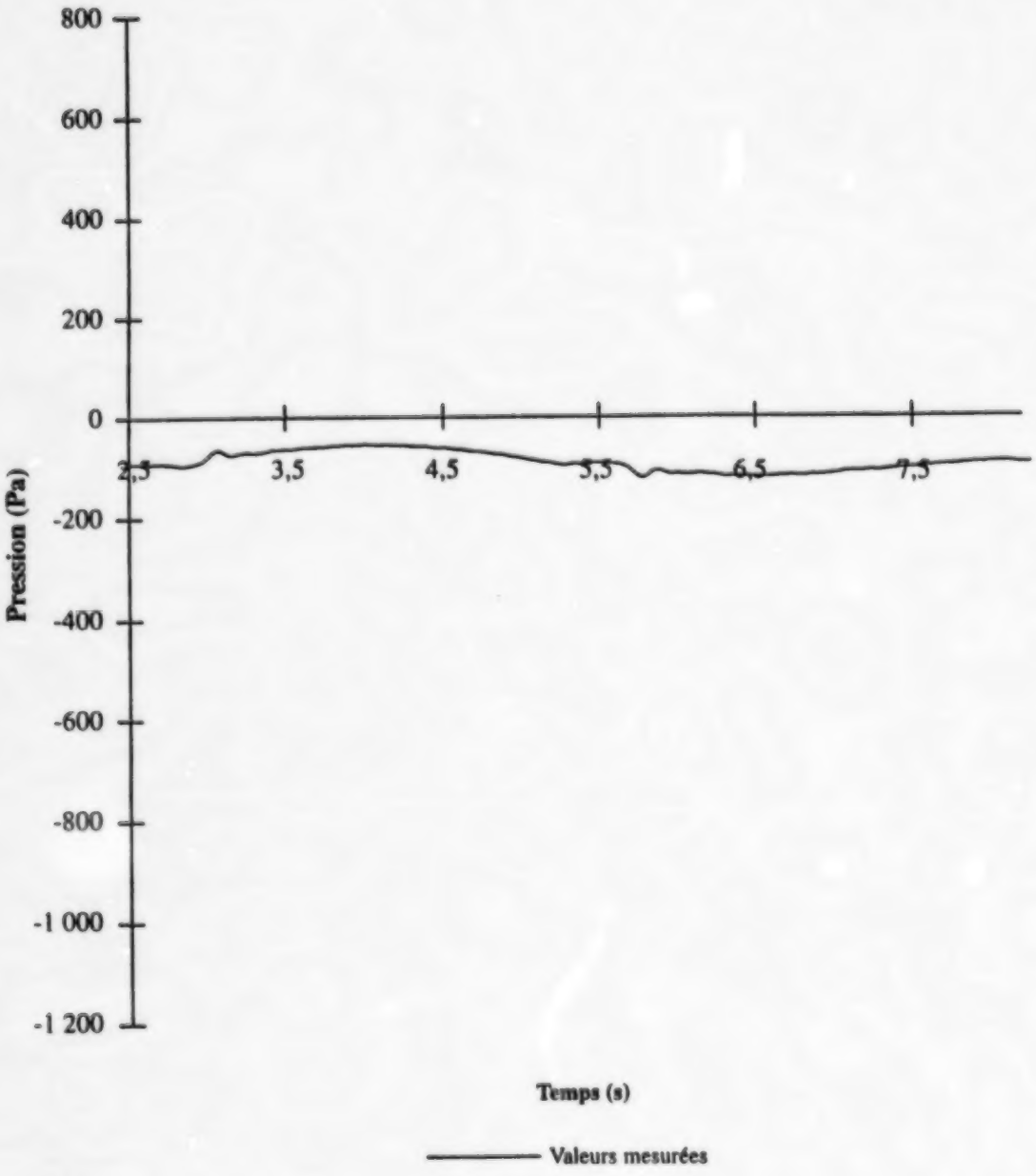
Orifice Goodco : période = 5,8 s, aucune pression appliquée



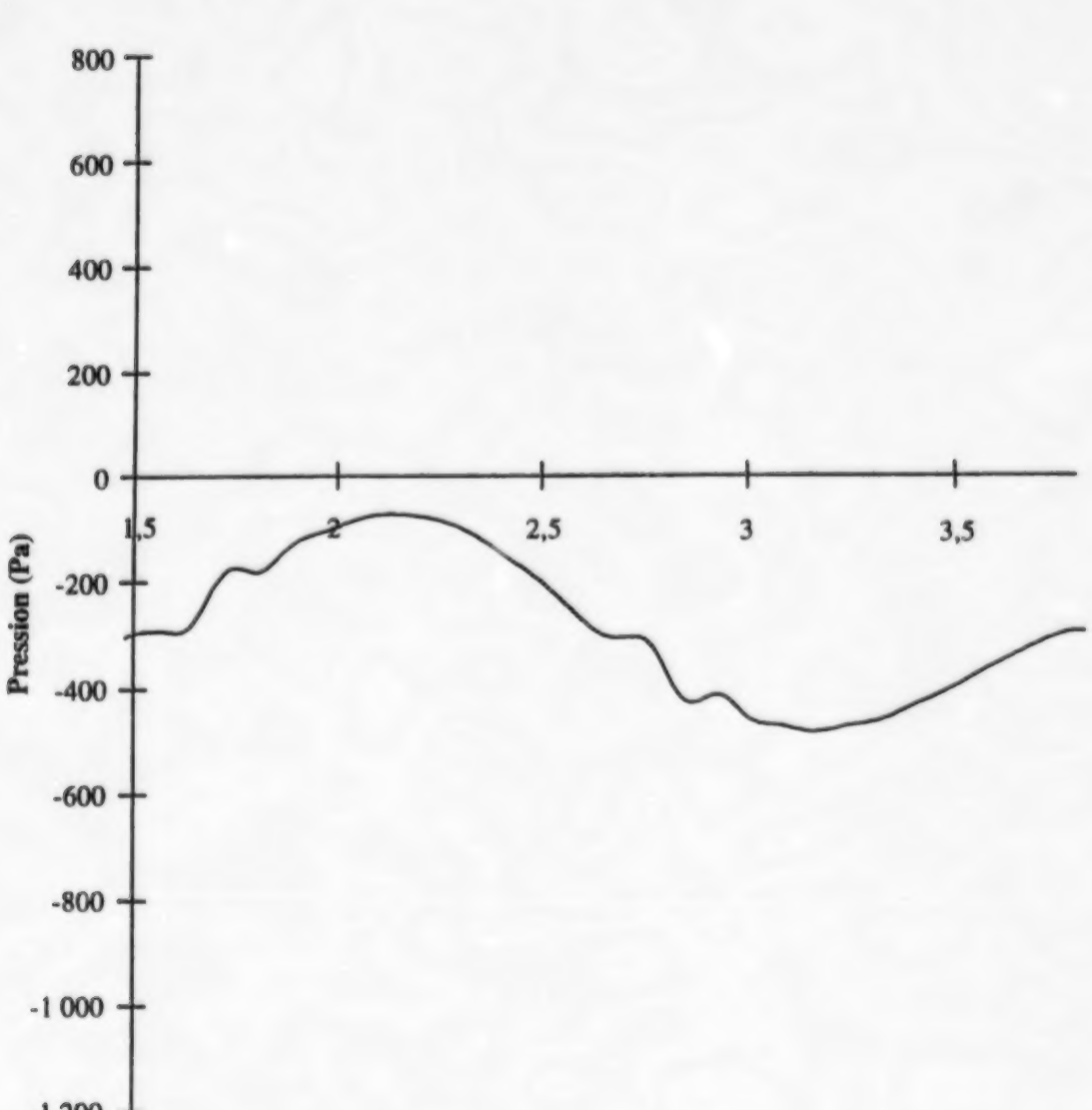
Orifice Goodco : période = 2,3 s, pression appliquée de –97 Pa



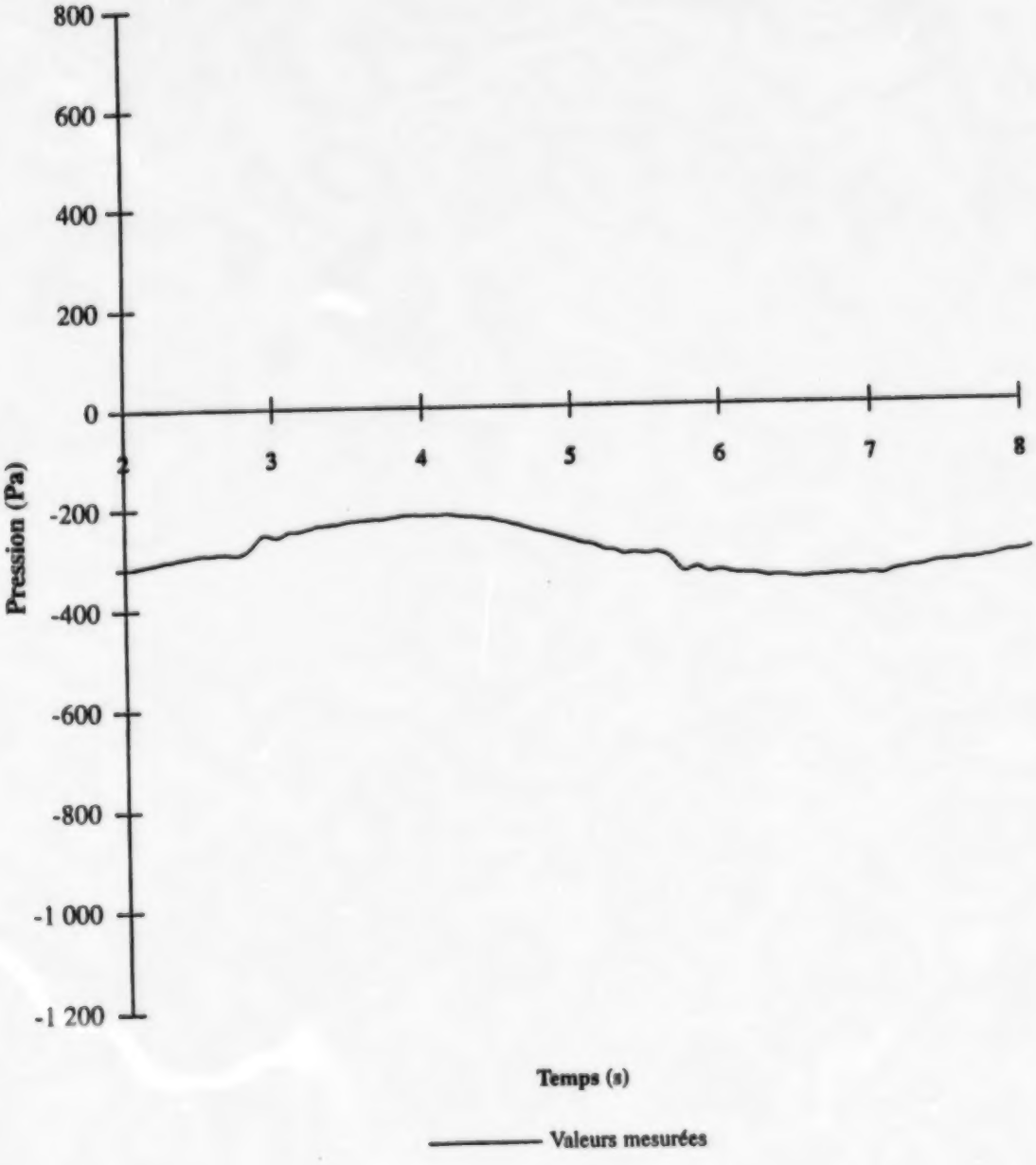
Orifice Goodco : période = 5,7 s, pression appliquée de –94 Pa



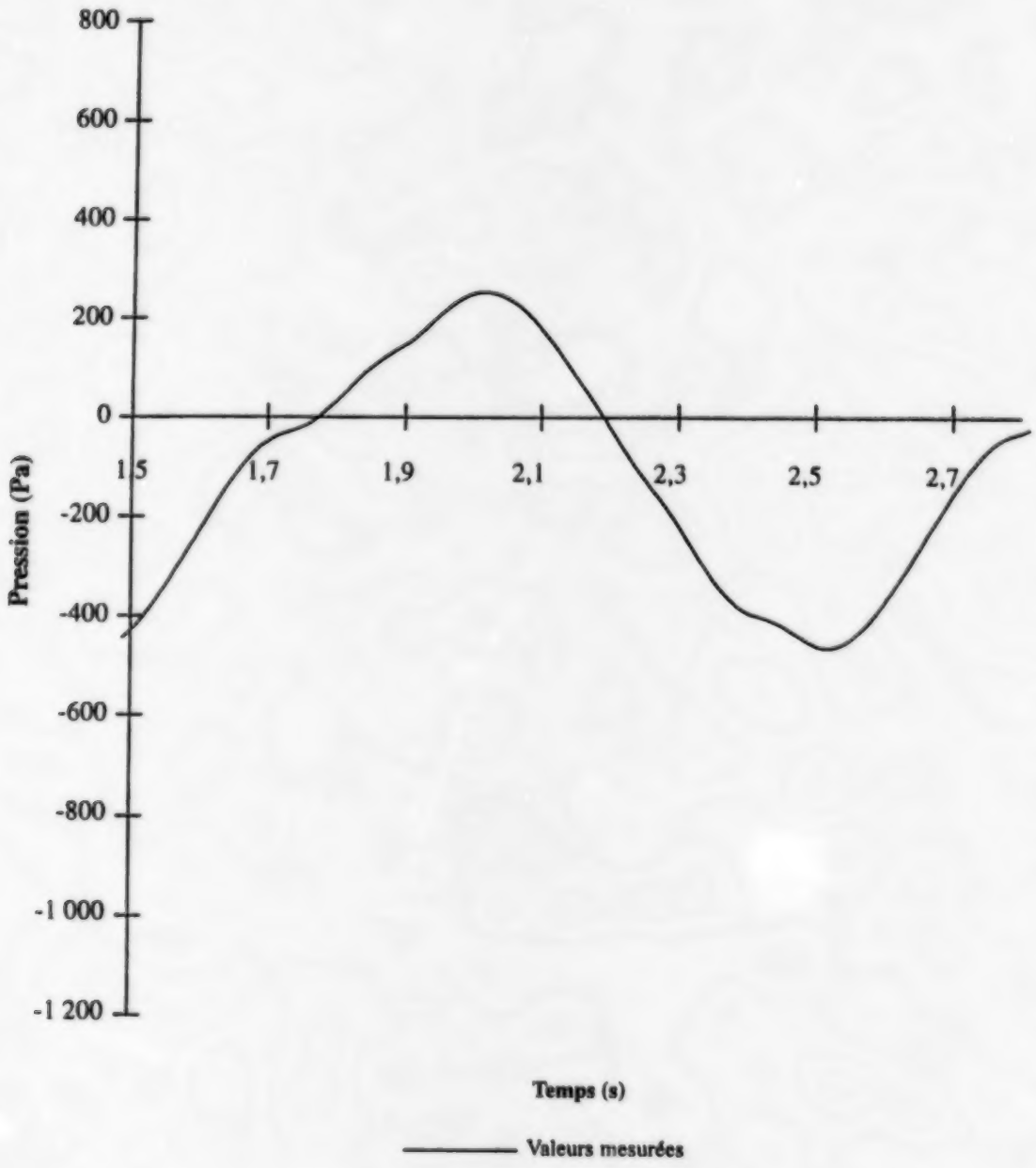
Orifice Goodco : période = 2,3 s, pression appliquée de –303 Pa



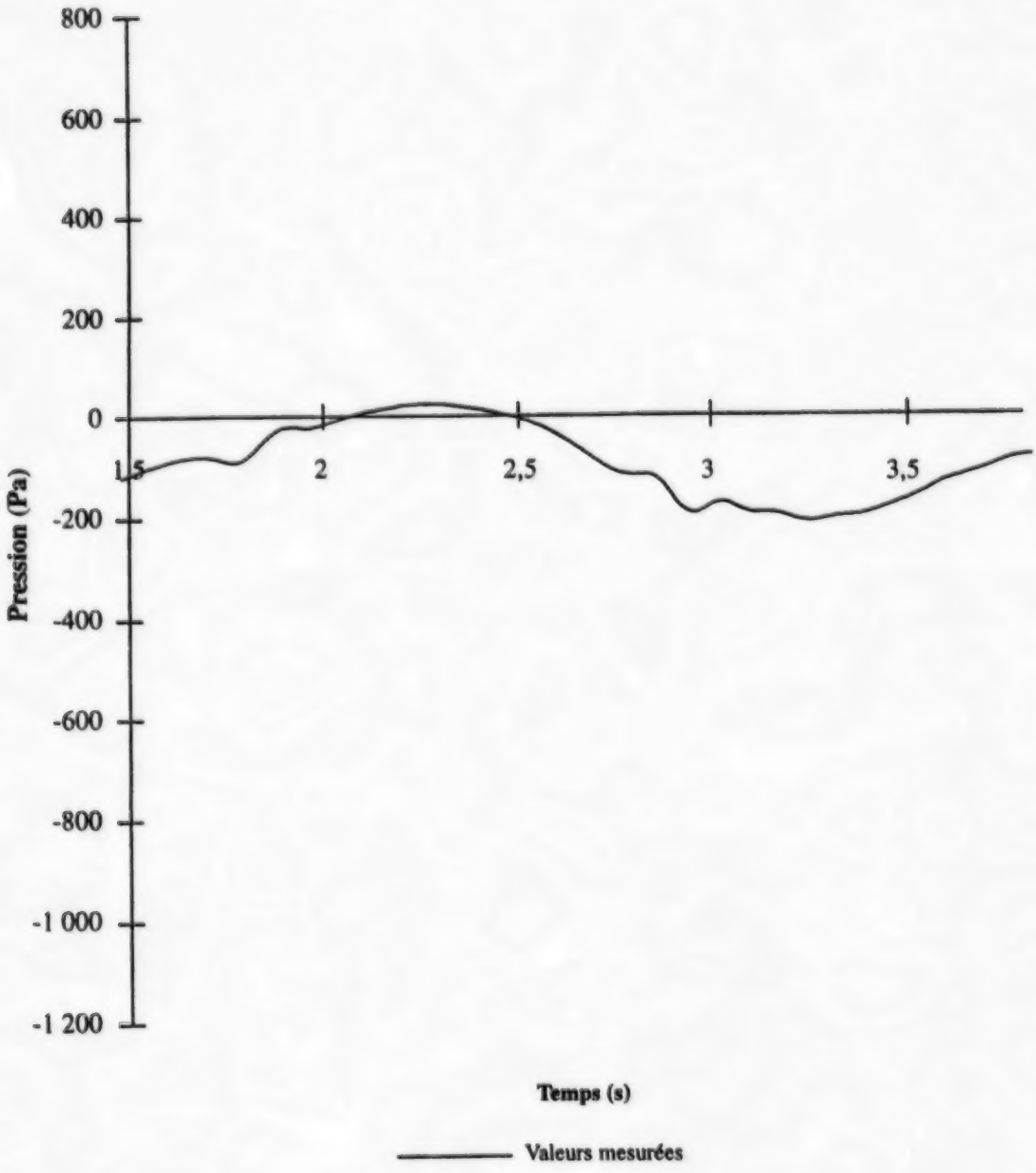
Orifice Goodco : période = 5,9 s, pression appliquée de -293 Pa



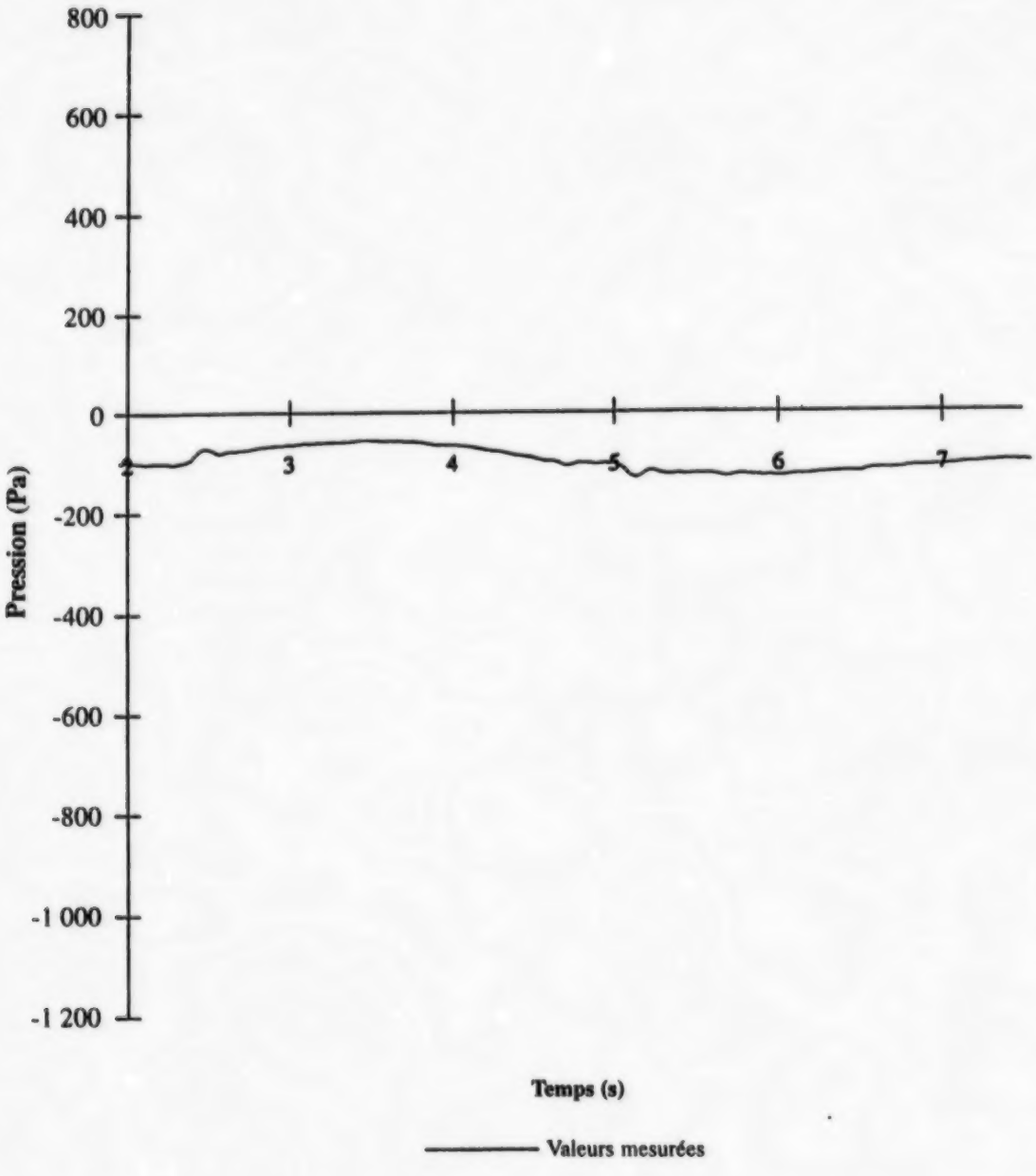
Orifice Yeovil : période = 1,1 s, pression appliquée de –100 Pa



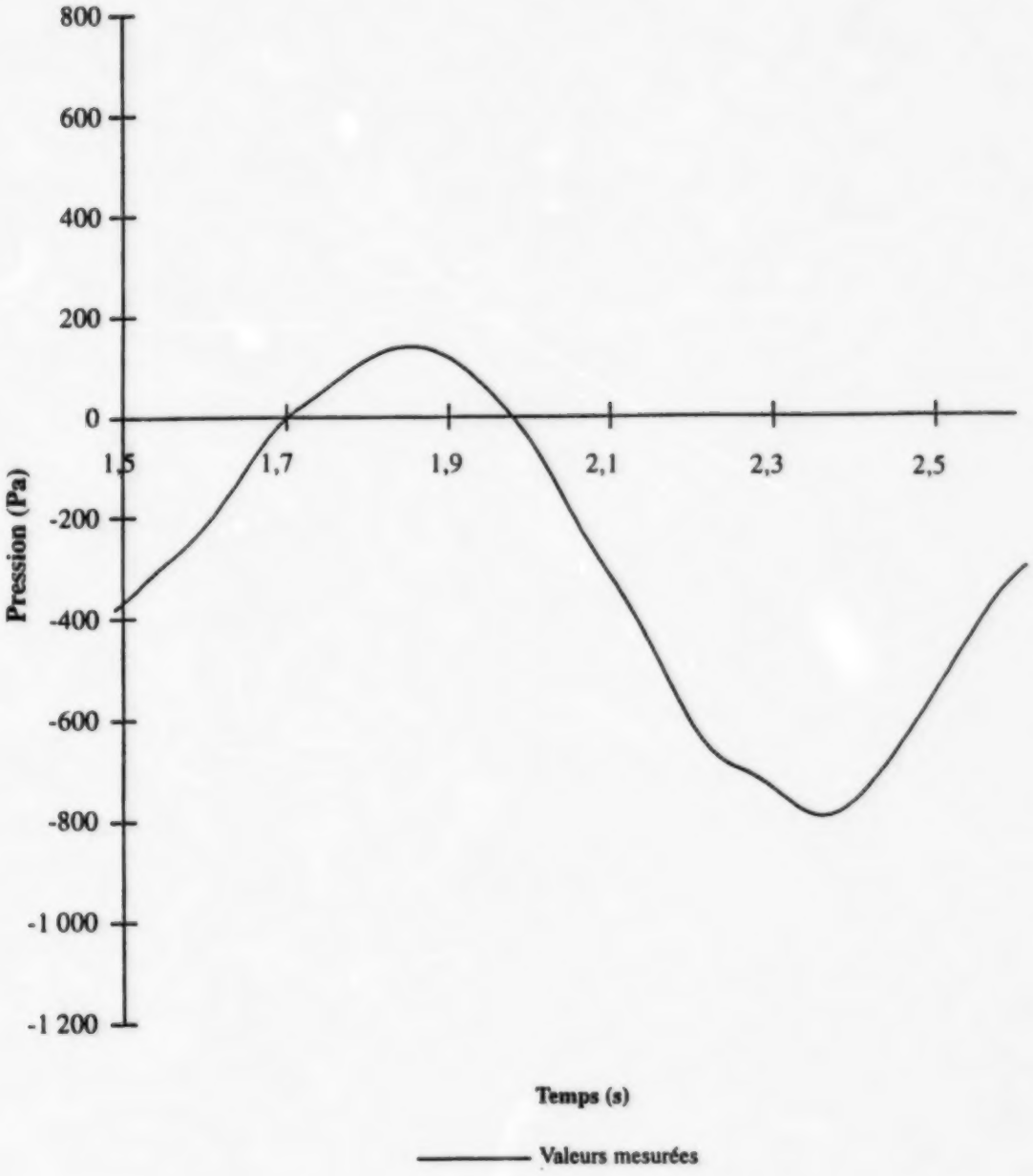
Orifice Yeovil : période = 2,2 s, pression appliquée de –103 Pa



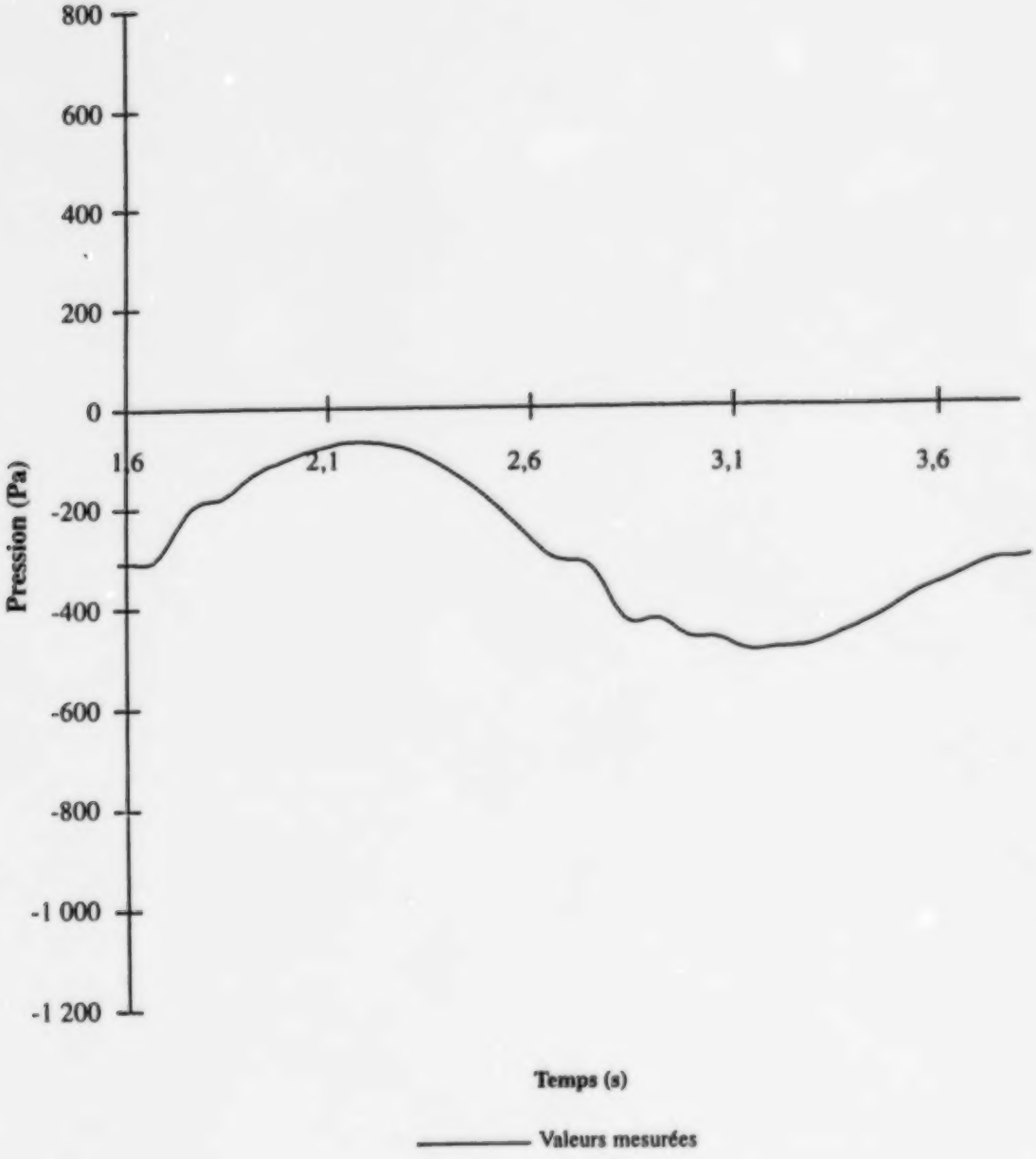
Orifice Yeovil : période = 5,3 s, pression appliquée de –101 Pa



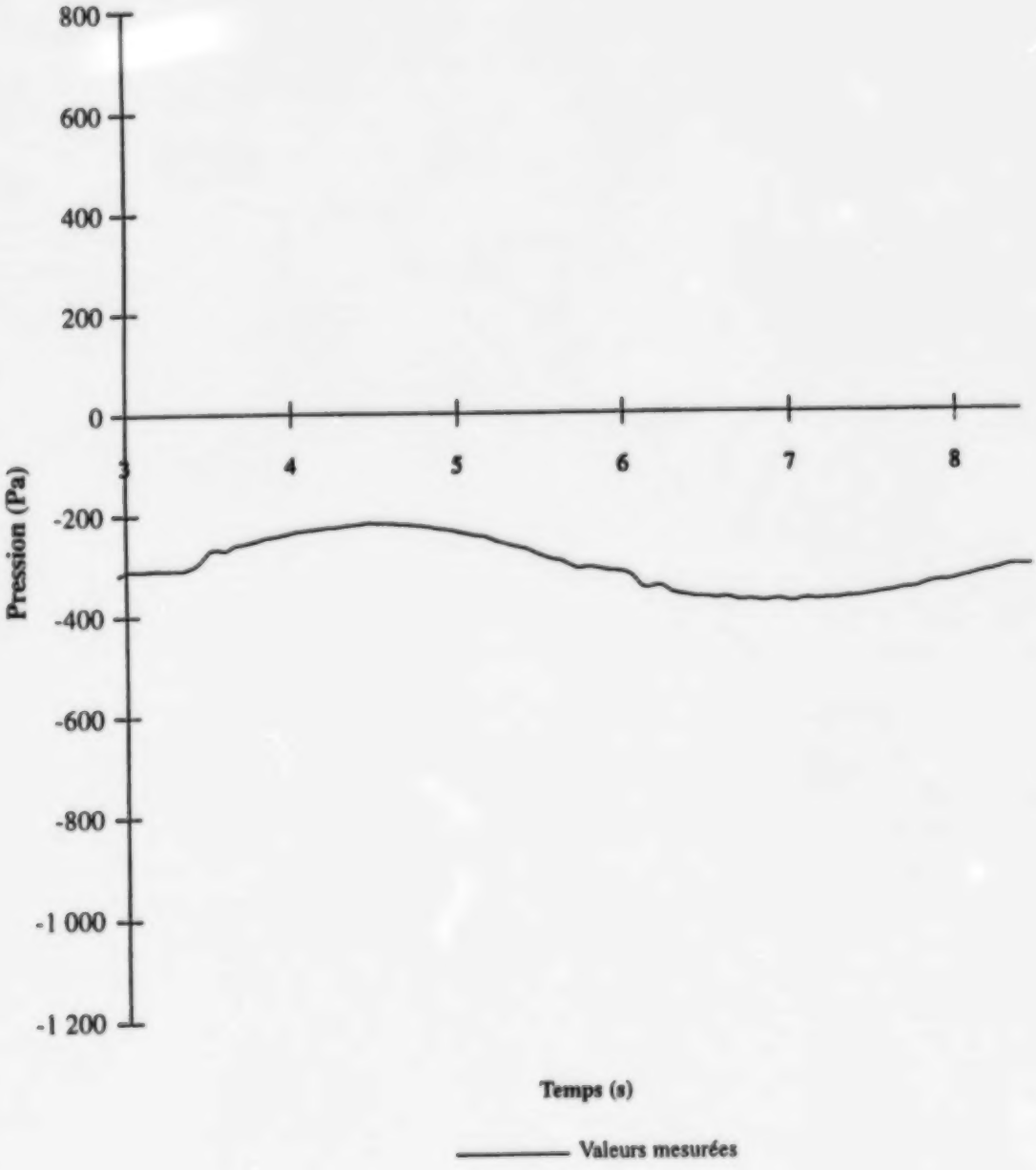
Évent Yeovil : période = 1,1 s, pression appliquée de –311 Pa



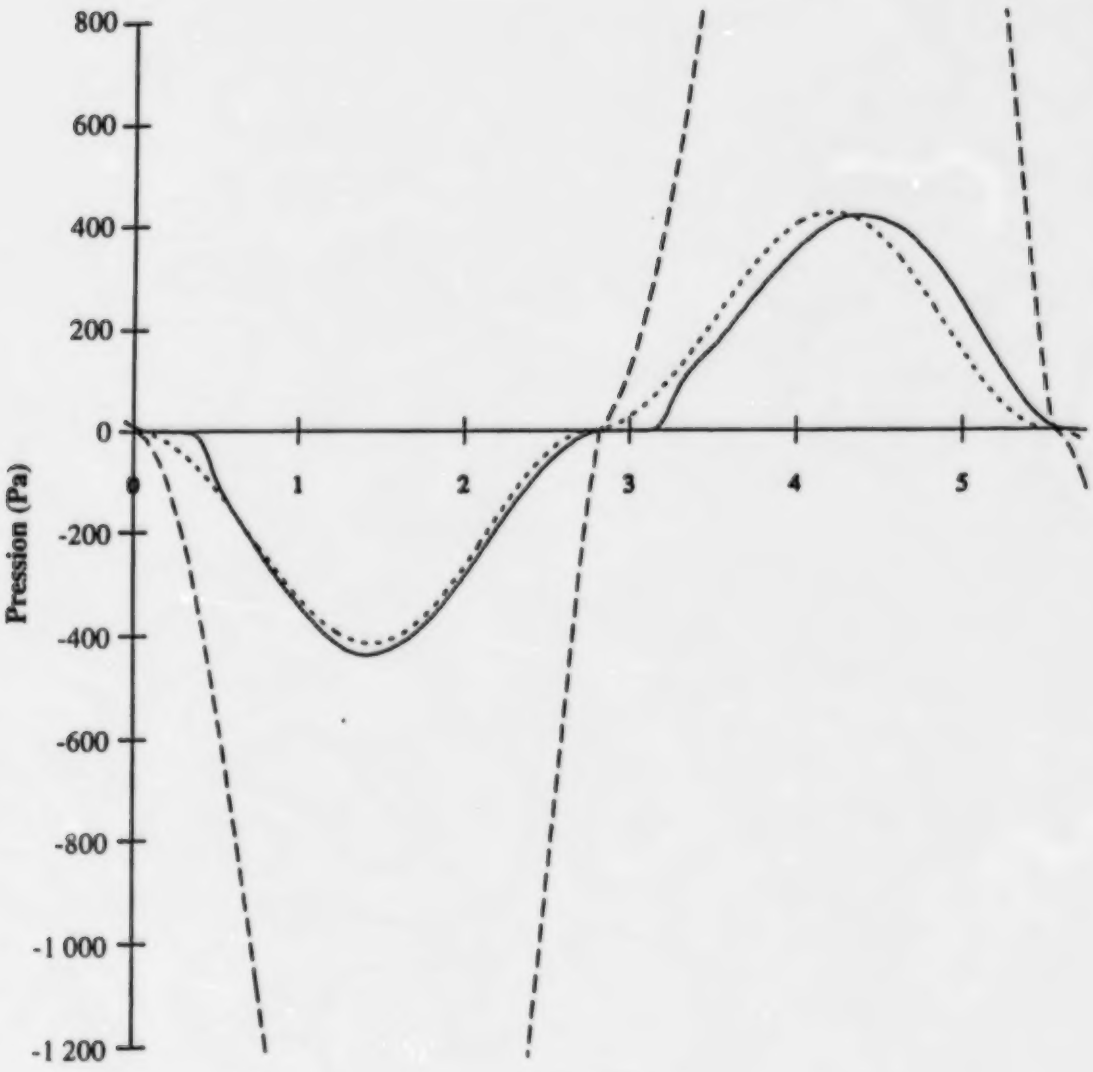
Orifice Yeovil : période = 2,2 s, pression appliquée de –312 Pa



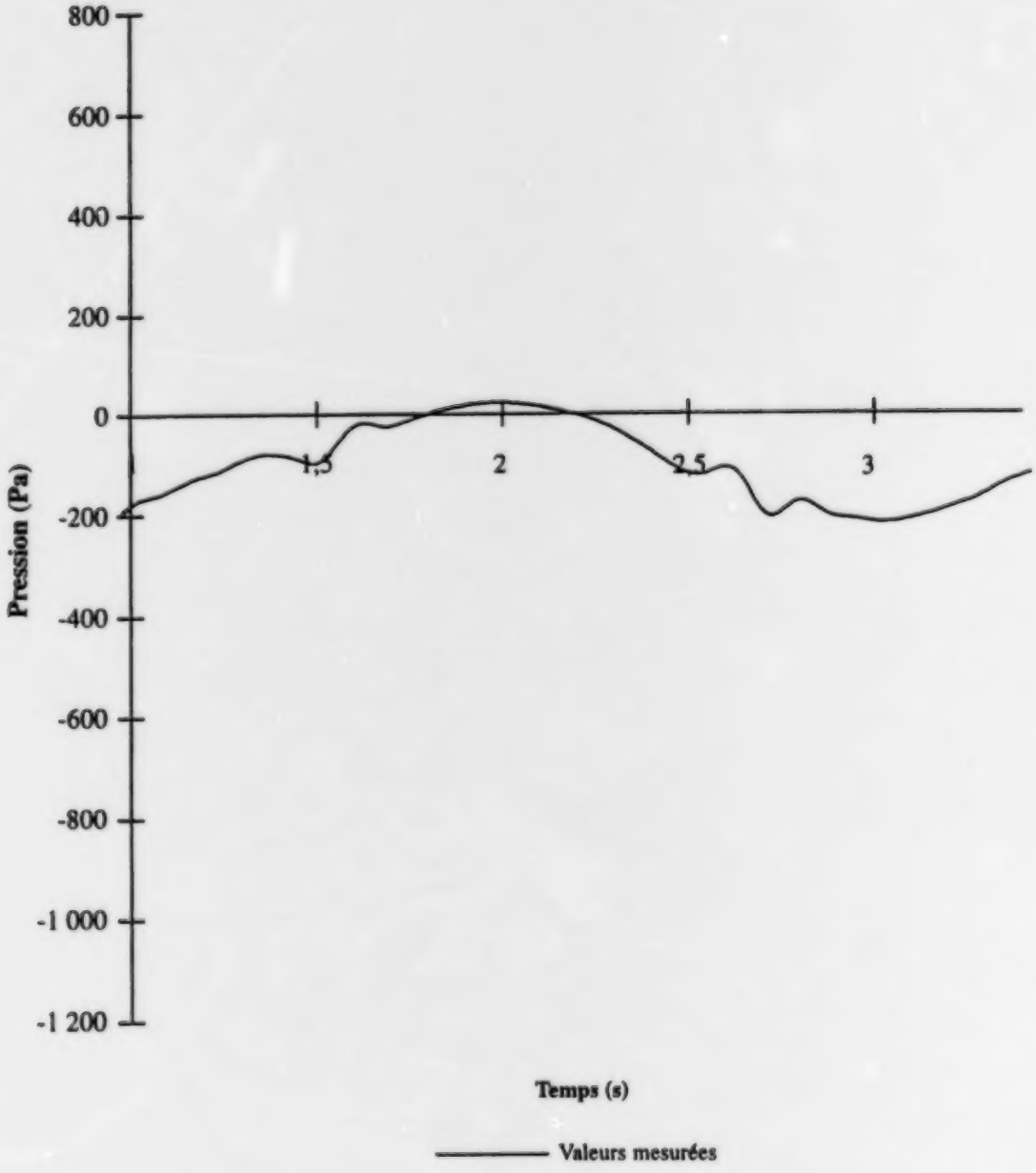
Orifice Yeovil : période = 5,2 s, pression appliquée de –309 Pa



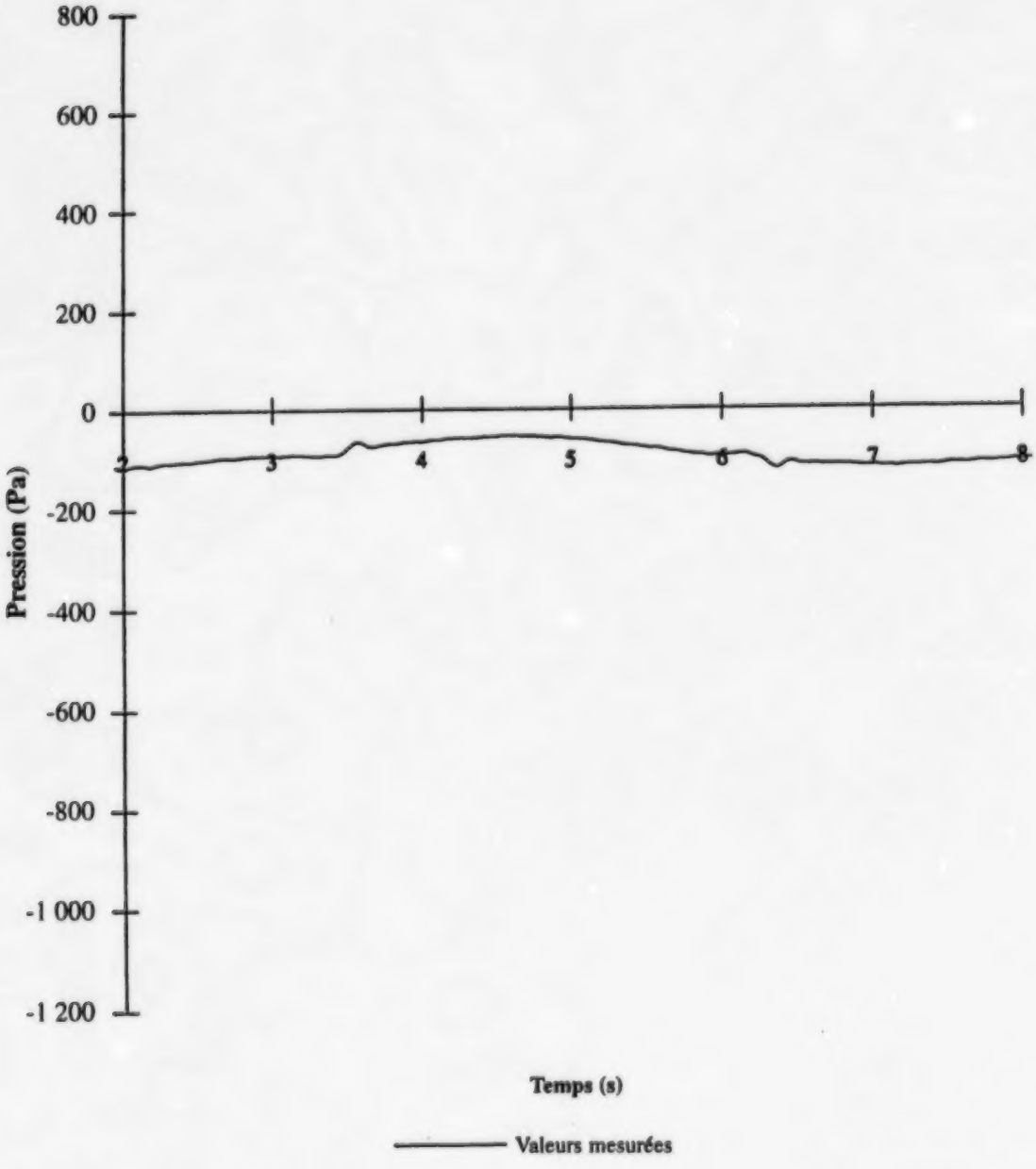
Orifice de style avion : période = 5,5 s, aucune pression appliquée



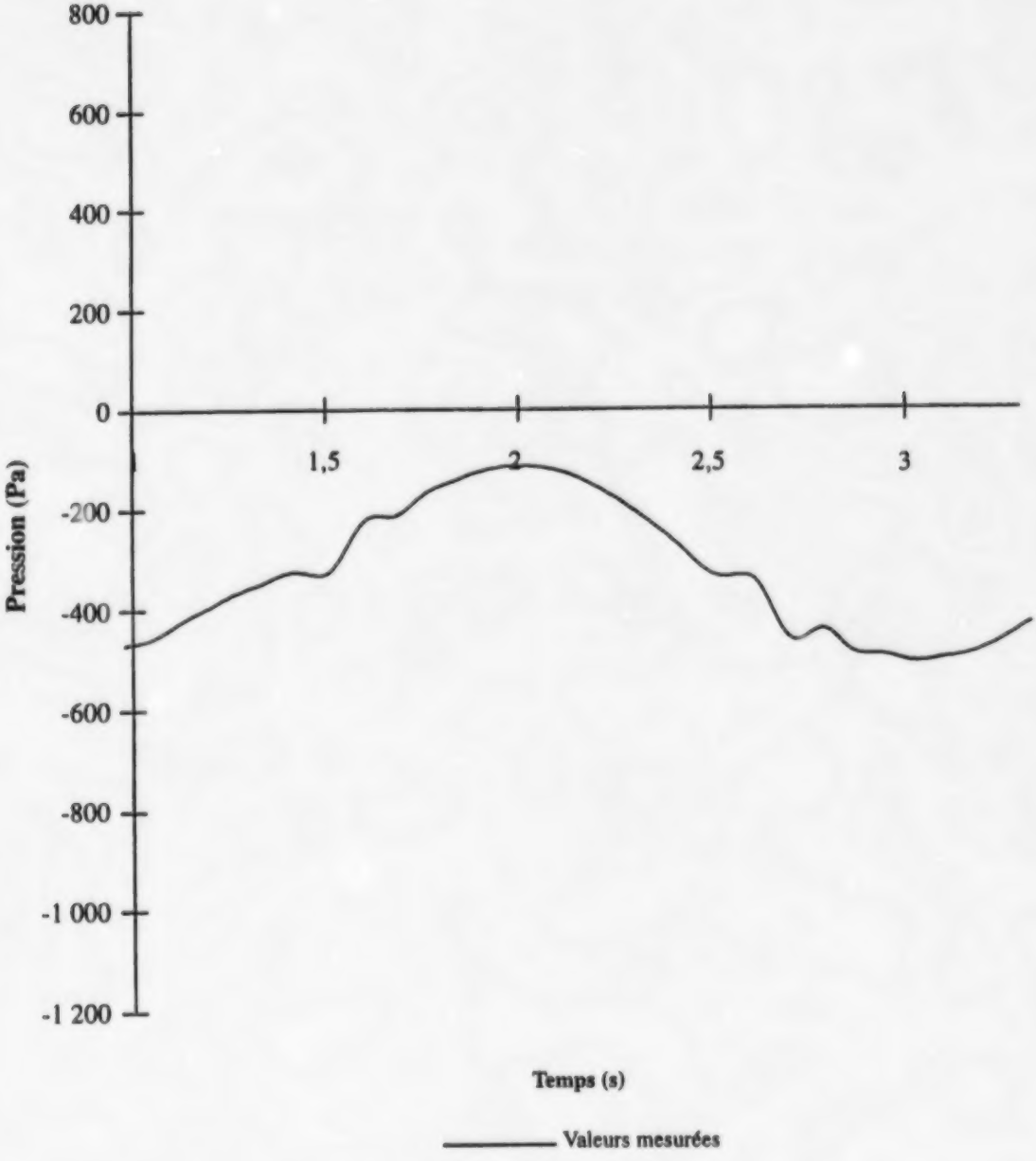
Orifice de style avion : période = 2,2 s, pression appliquée de –103 Pa



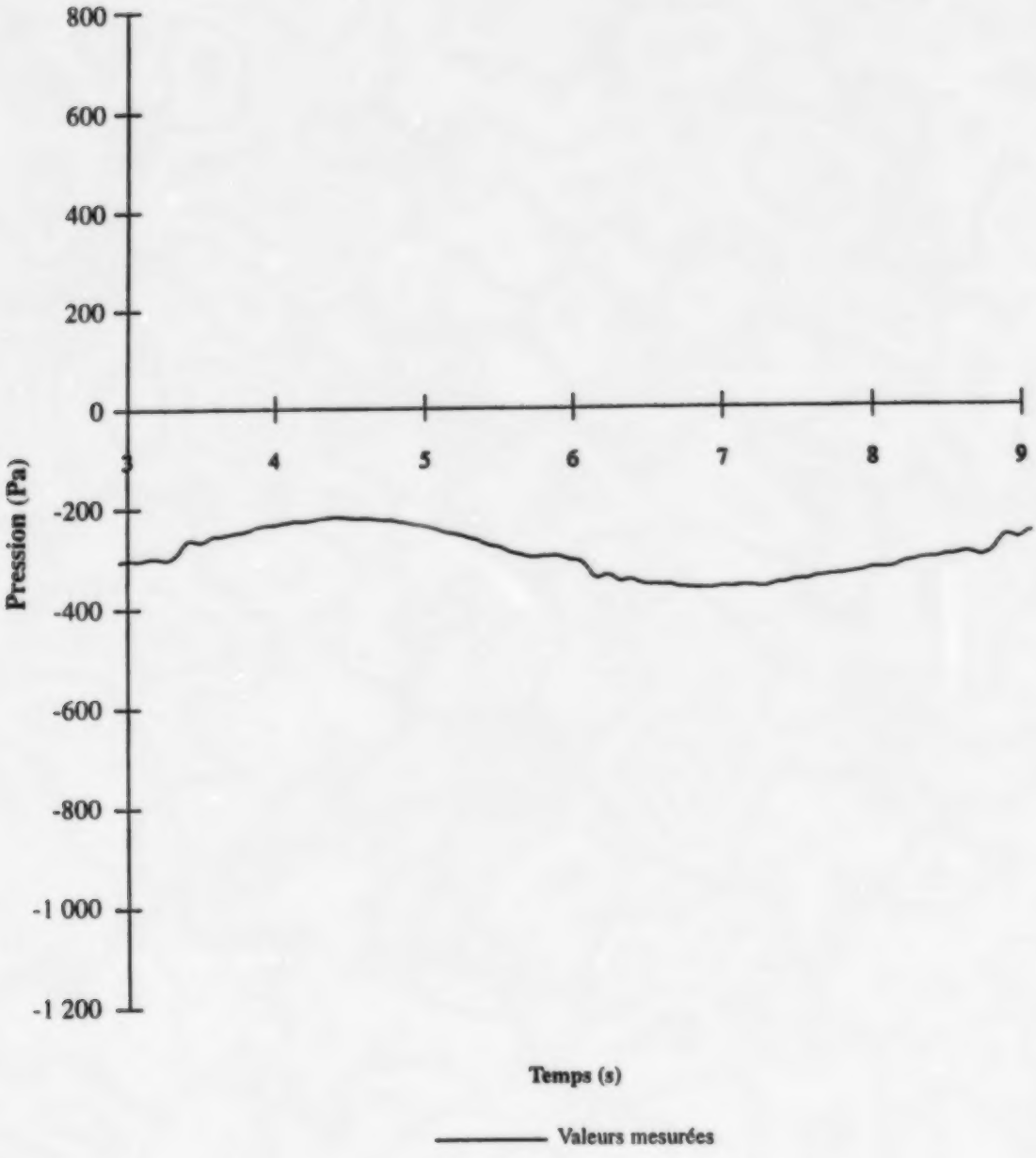
Orifice de style avion : période = 5,6 s, pression appliquée de –95 Pa



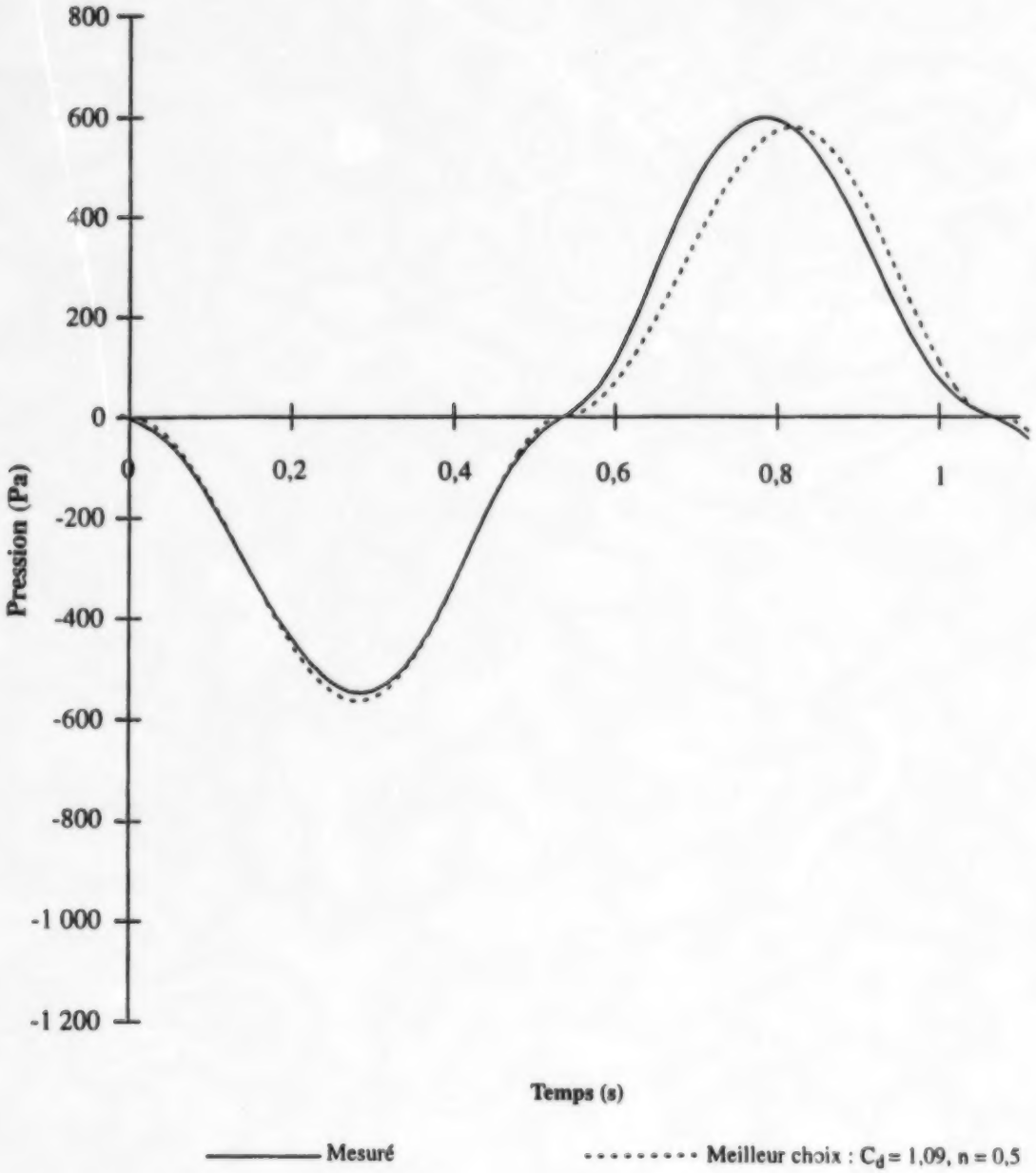
Orifice de style avion : période = 2,2 s, pression appliquée de –339 Pa



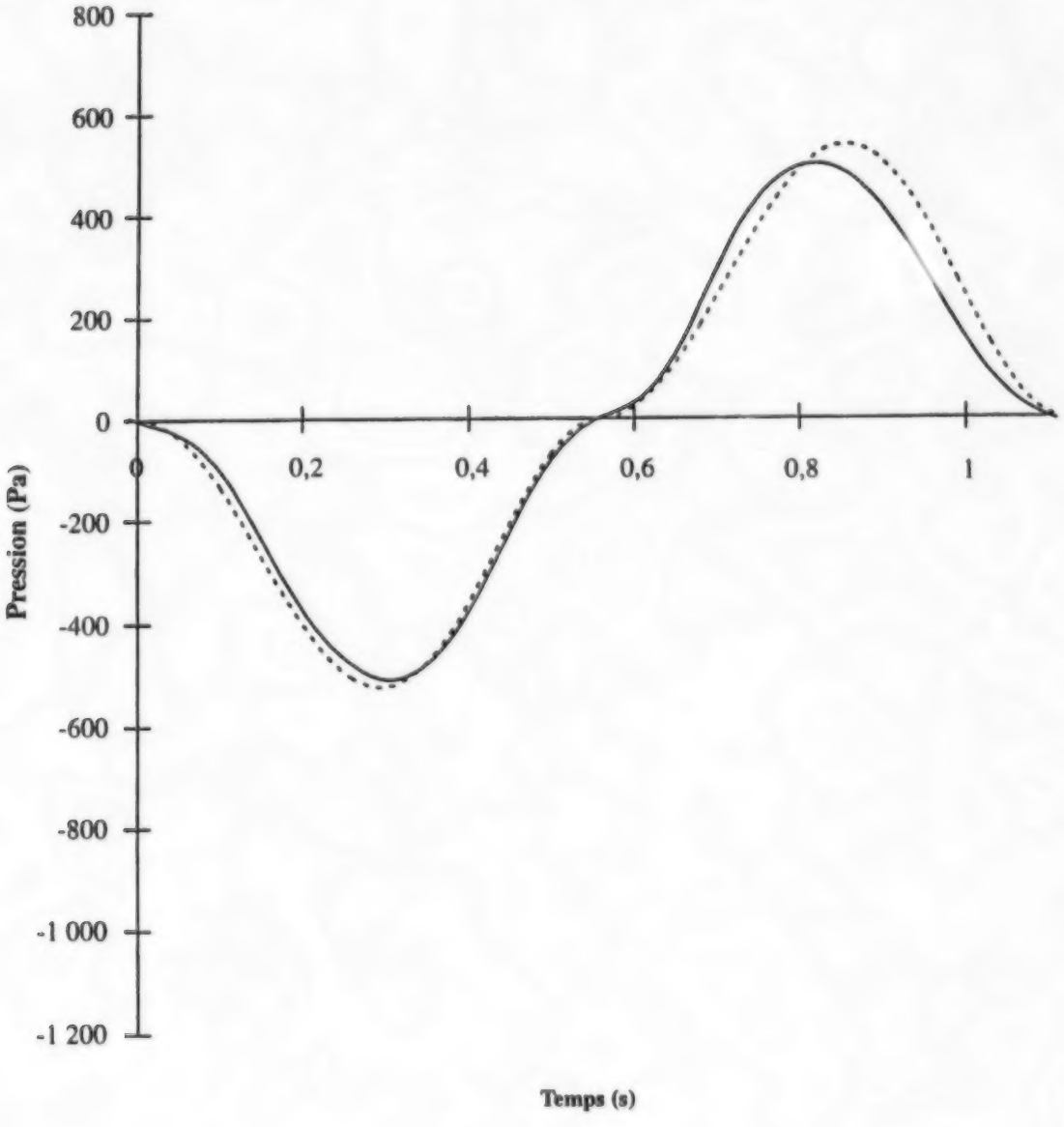
Orifice de style avion : période = 5,5 s, pression appliquée de –300 Pa



Orifice de 22,6 mm : période = 1,1 s, aucune pression appliquée



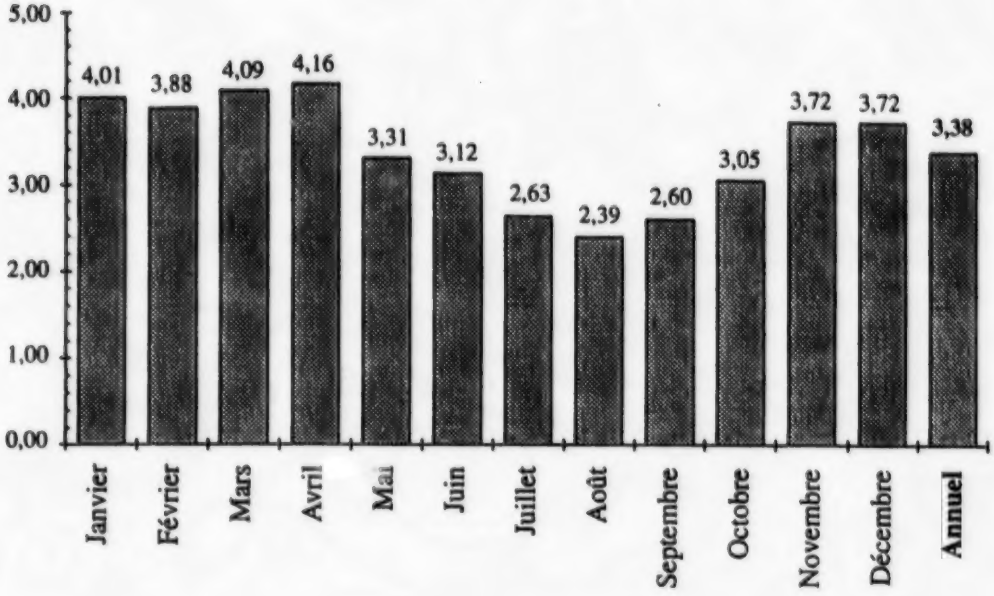
Tuyau de 90 mm : période = 1,1 s, aucune pression appliquée



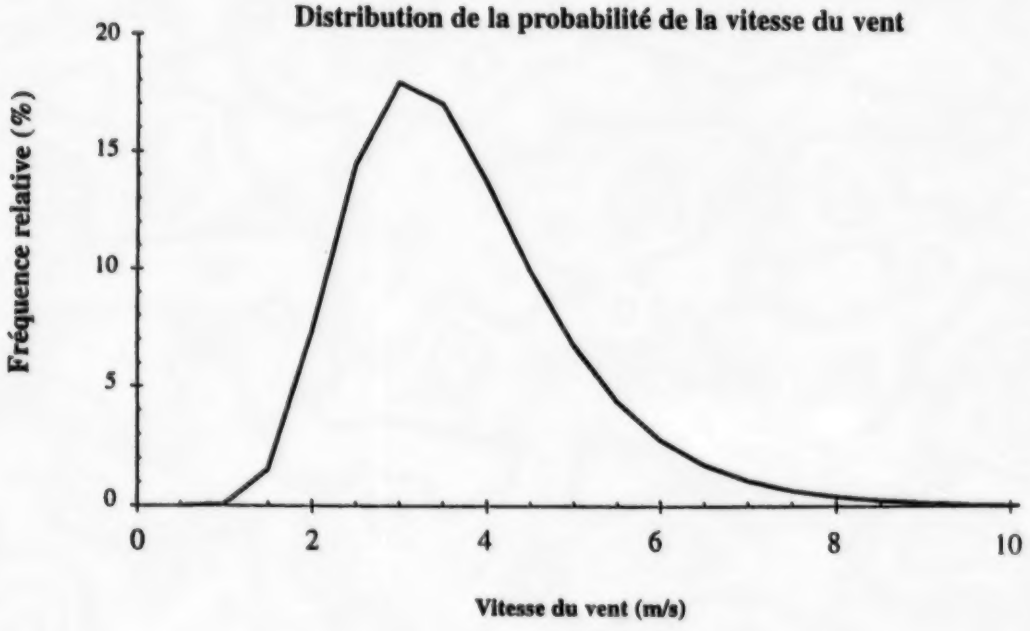
Annexe C

Certaines statistiques sommaires sur la vitesse et la direction du vent, ainsi que les pressions de ventilation mesurées au Beghut

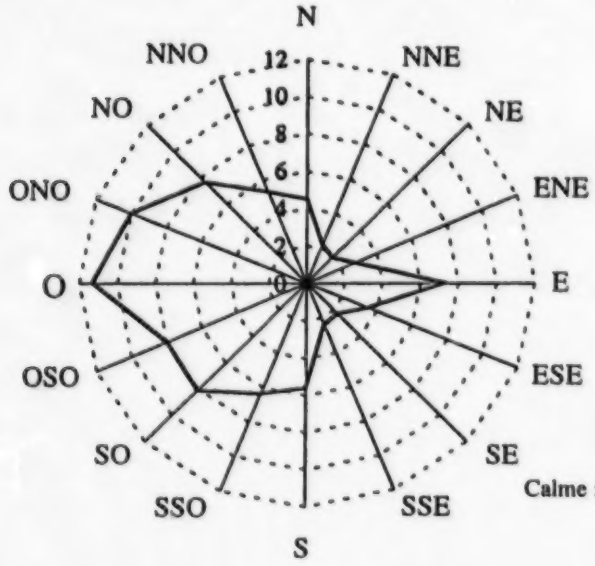
Vitesse moyenne mensuelle du vent [m/s] (normales pour Waterloo et l'aéroport Wellington)



Distribution de la probabilité de la vitesse du vent

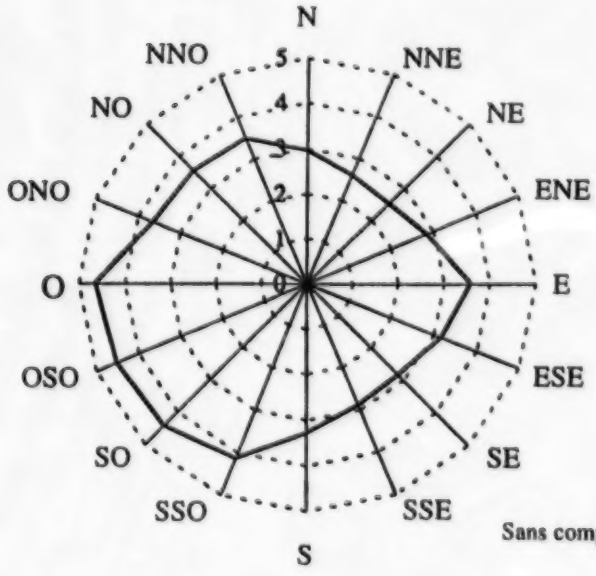


Fréquence de la direction du vent pour Waterloo (%)

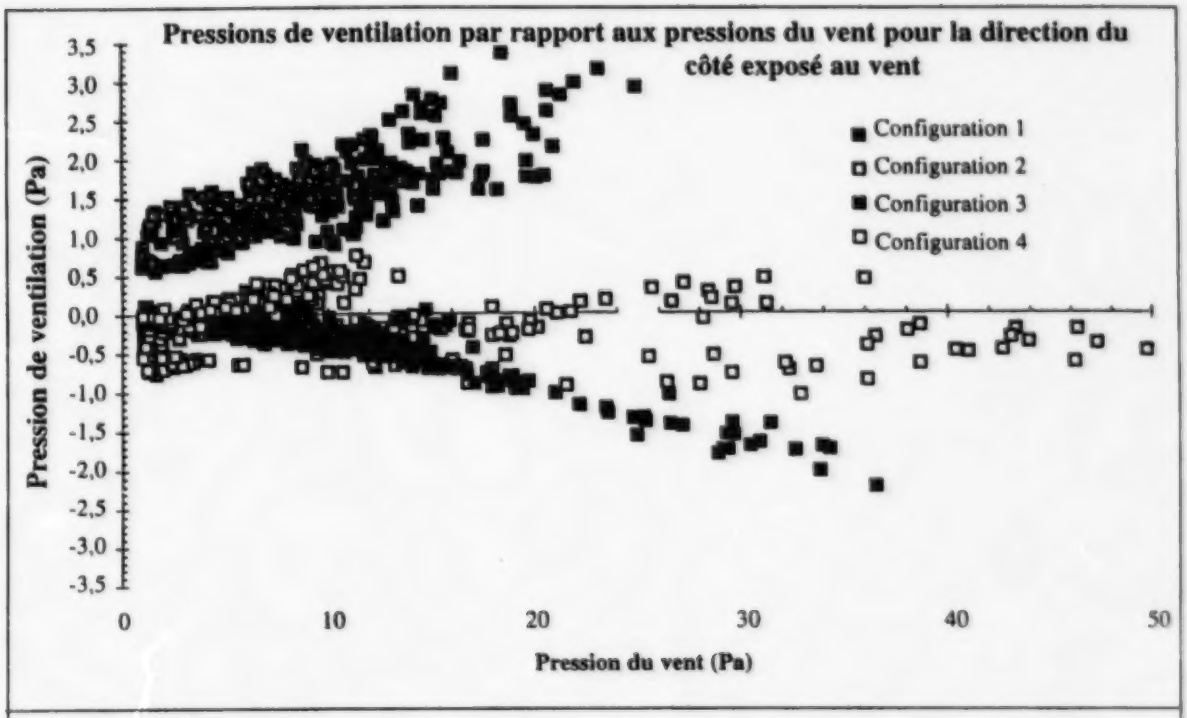


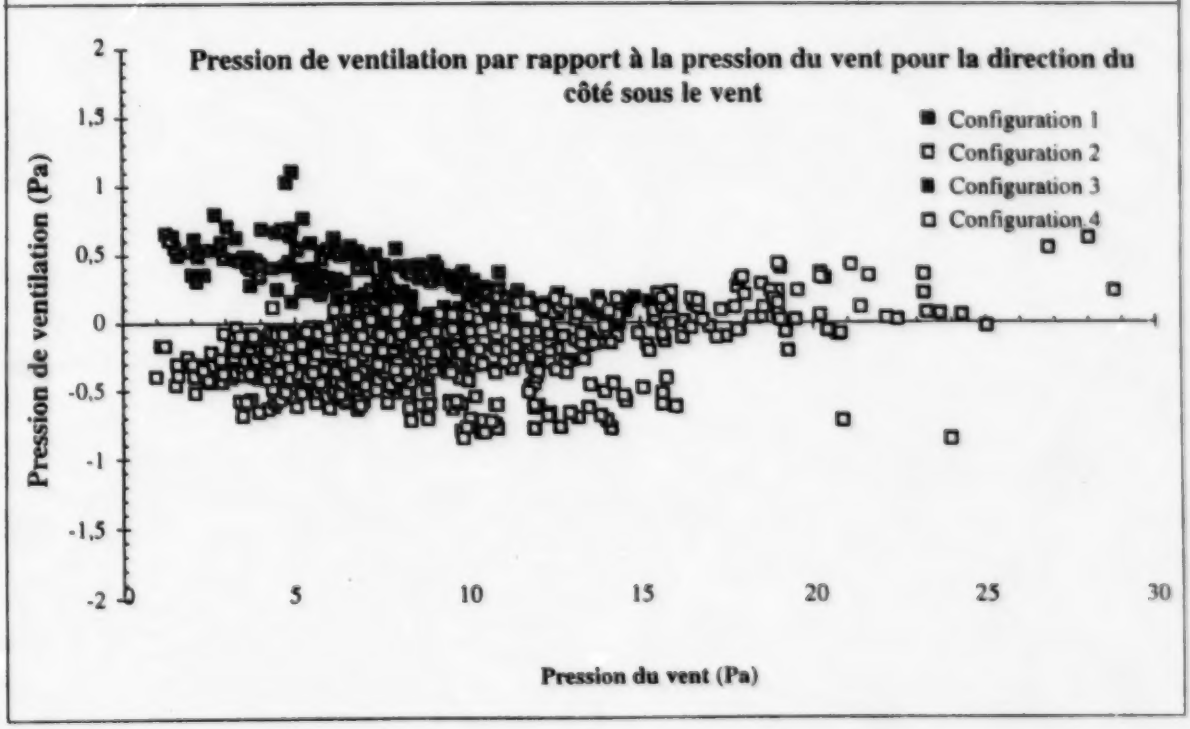
Calme : 10,4 %

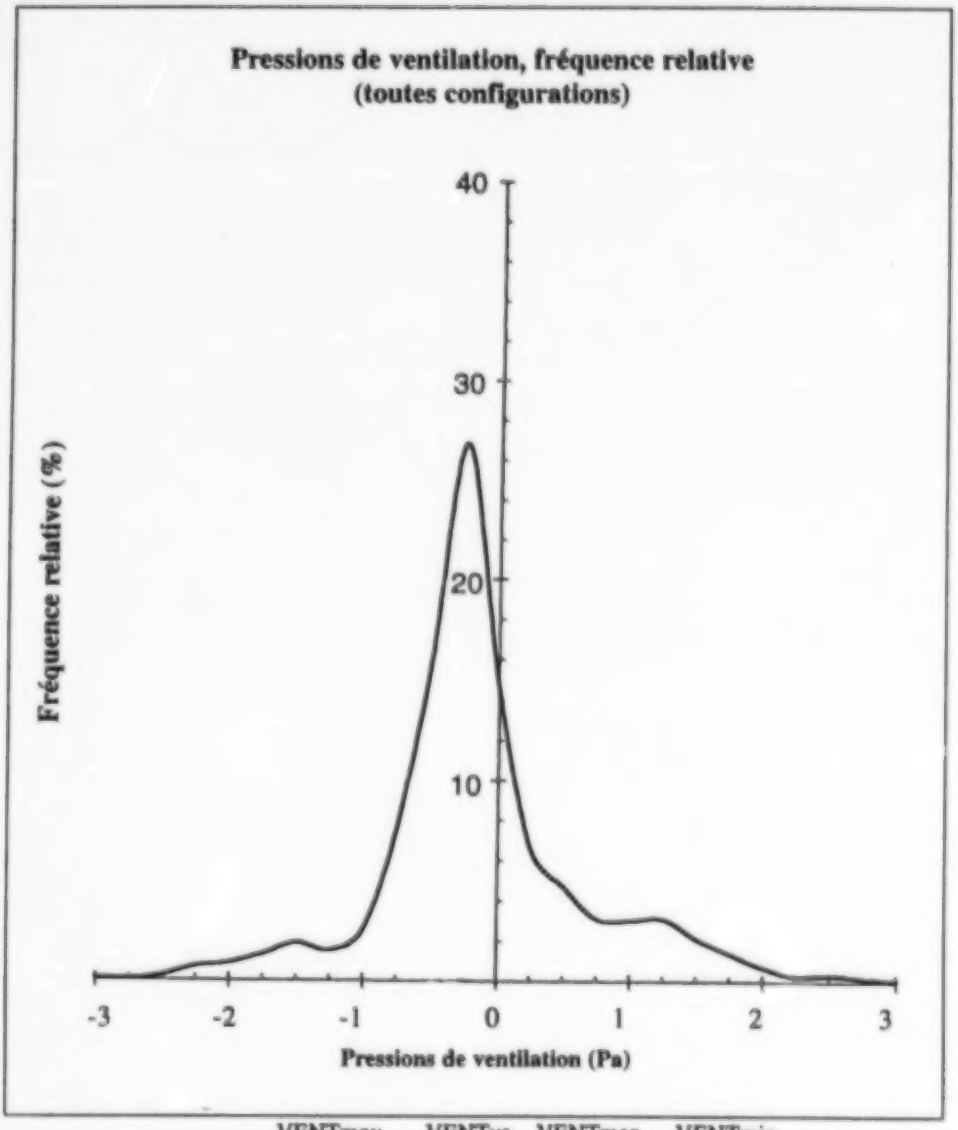
Vitesse moyenne du vent à Waterloo (m/s)



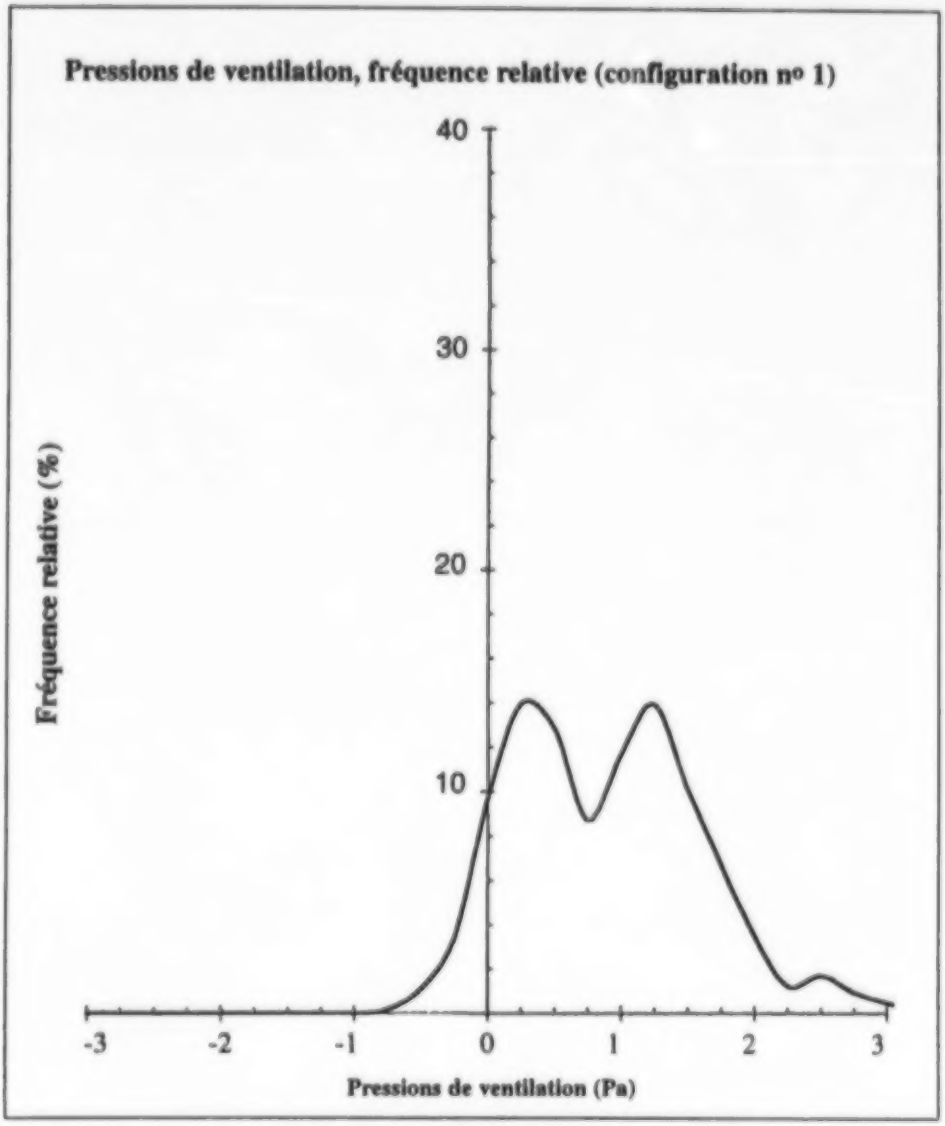
Sans compter les heures calmes de 10,4 %


Pressions de ventilation par rapport aux pressions du vent pour la direction du côté exposé au vent
Configuration 1
Configuration 2
Configuration 3
Configuration 4
Pression de ventilation (Pa)
3,5
3,0
2,5
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
-0,5
-1,0
-1,5
-2,0
-2,5
-3,0
-3,5
0
10
20
30
40
50
Pression du vent (Pa)

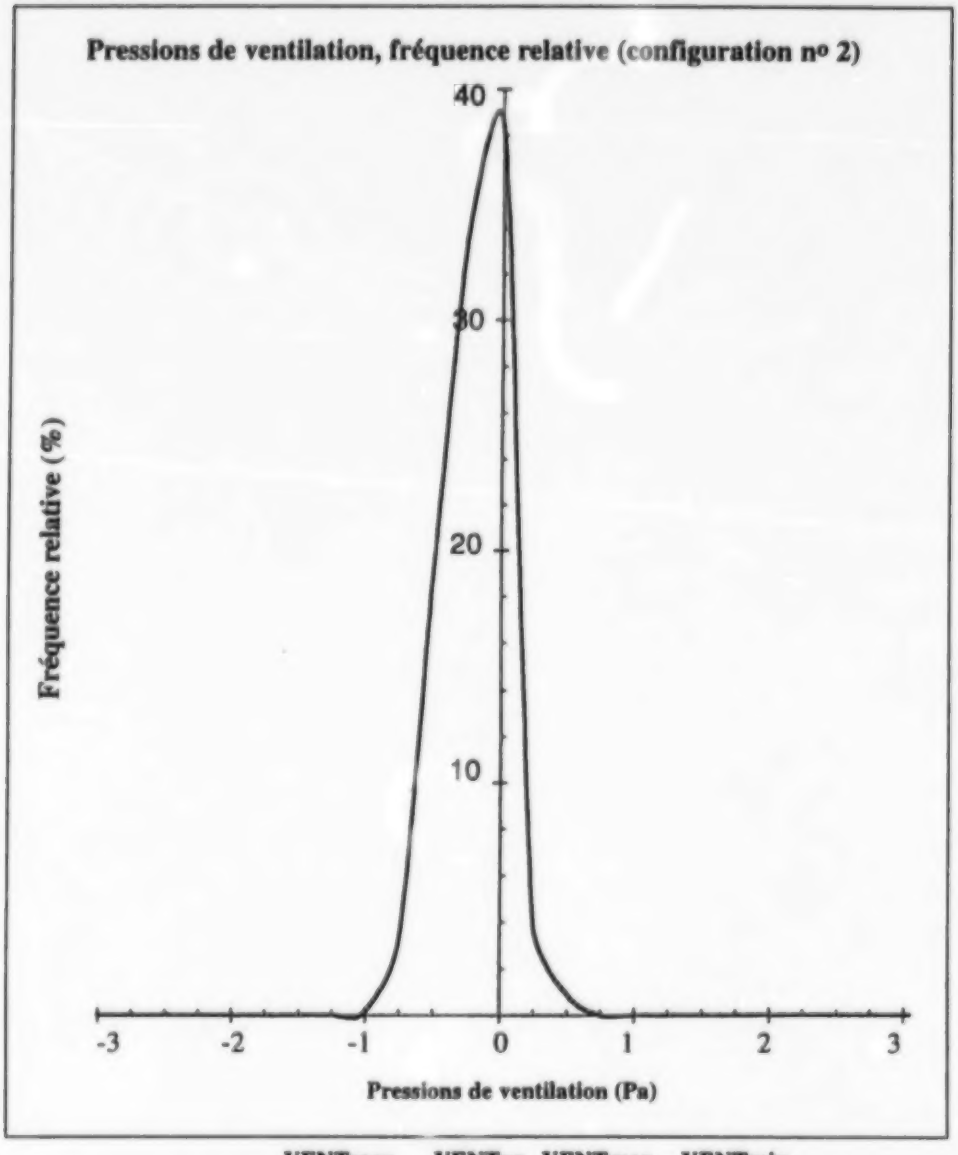

Pression de ventilation par rapport à la pression du vent pour la direction du côté sous le vent
Configuration 1
Configuration 2
Configuration 3
Configuration 4
Pression de ventilation (Pa)
2
1,5
1
0,5
0
-0,5
-1
-1,5
-2
0
5
10
15
20
25
30
Pression du vent (Pa)



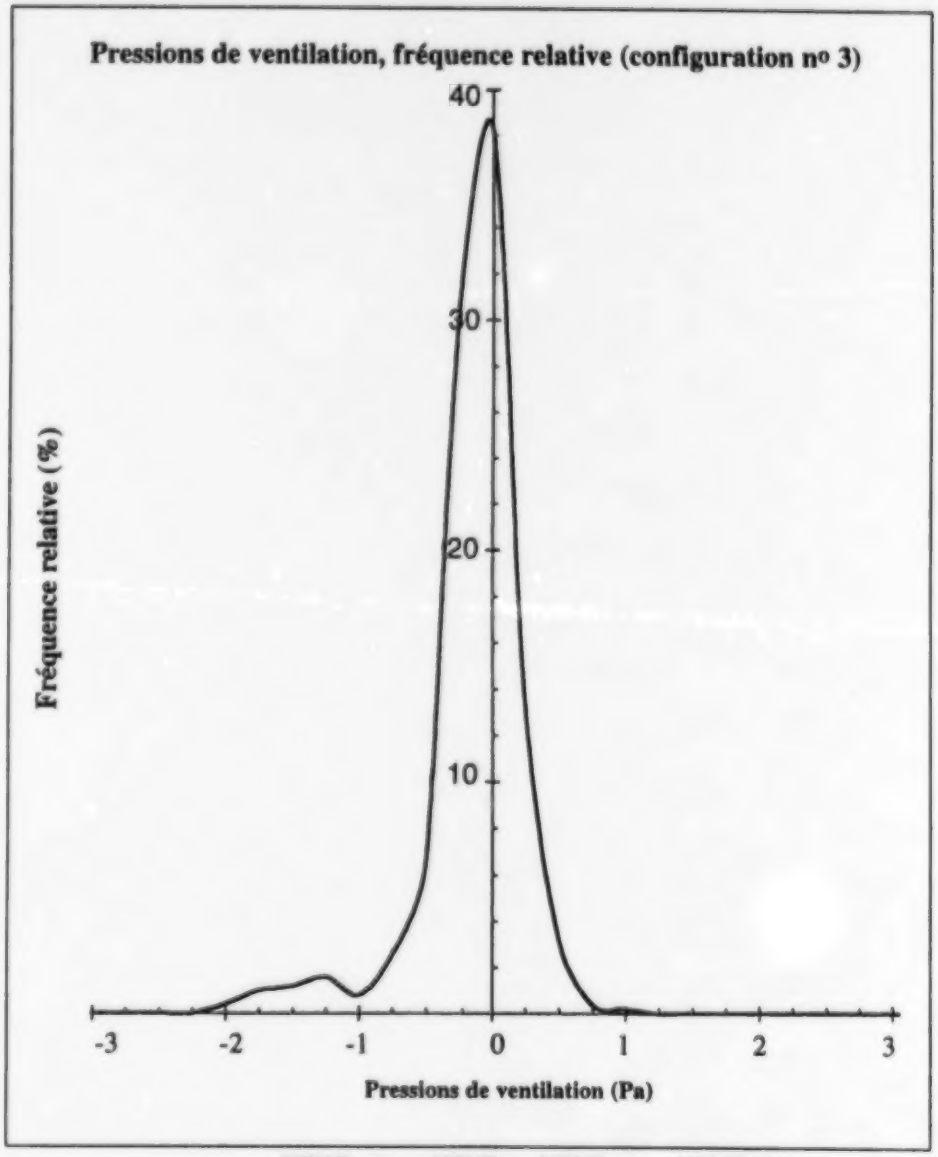
	VENTmoy	VENTve	VENTmax	VENTmin
Moyenne	0,006	0,904	3,730	-3,915
Valeur efficace	0,775	1,139	3,811	5,086
Max.	3,330	8,662	12,480	1,030
Min.	-3,000	0,020	- 0,620	-17,380
Gamme	6,330	8,642	13,100	18,410
Nombre total de relevés :		3 287		



	VENTmoy	VENTve	VENTmax	VENTmin
Moyenne	1,014	0,500	3,422	-0,461
Valeur efficace	0,701	0,379	2,691	1,438
Max.	3,330	1,827	11,850	1,030
Min.	-0,510	0,049	0,420	-16,770
Nombre :	654			

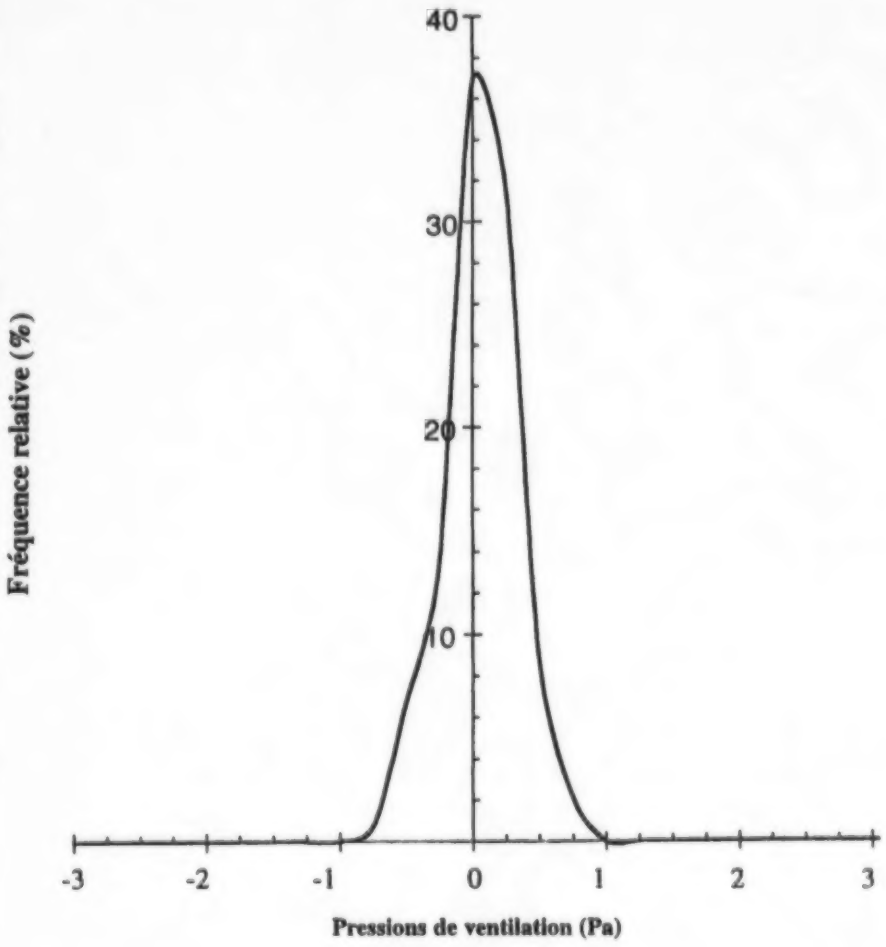


	VENTmoy	VENTve	VENTmax	VENTmin
Moyenne	-0,308	0,402	1,493	-2,403
Valeur efficace	0,230	0,533	2,321	2,930
Max.	0,440	3,537	11,900	-0,270
Min.	-1,060	0,023	-0,620	-16,570
Nombre :	658			

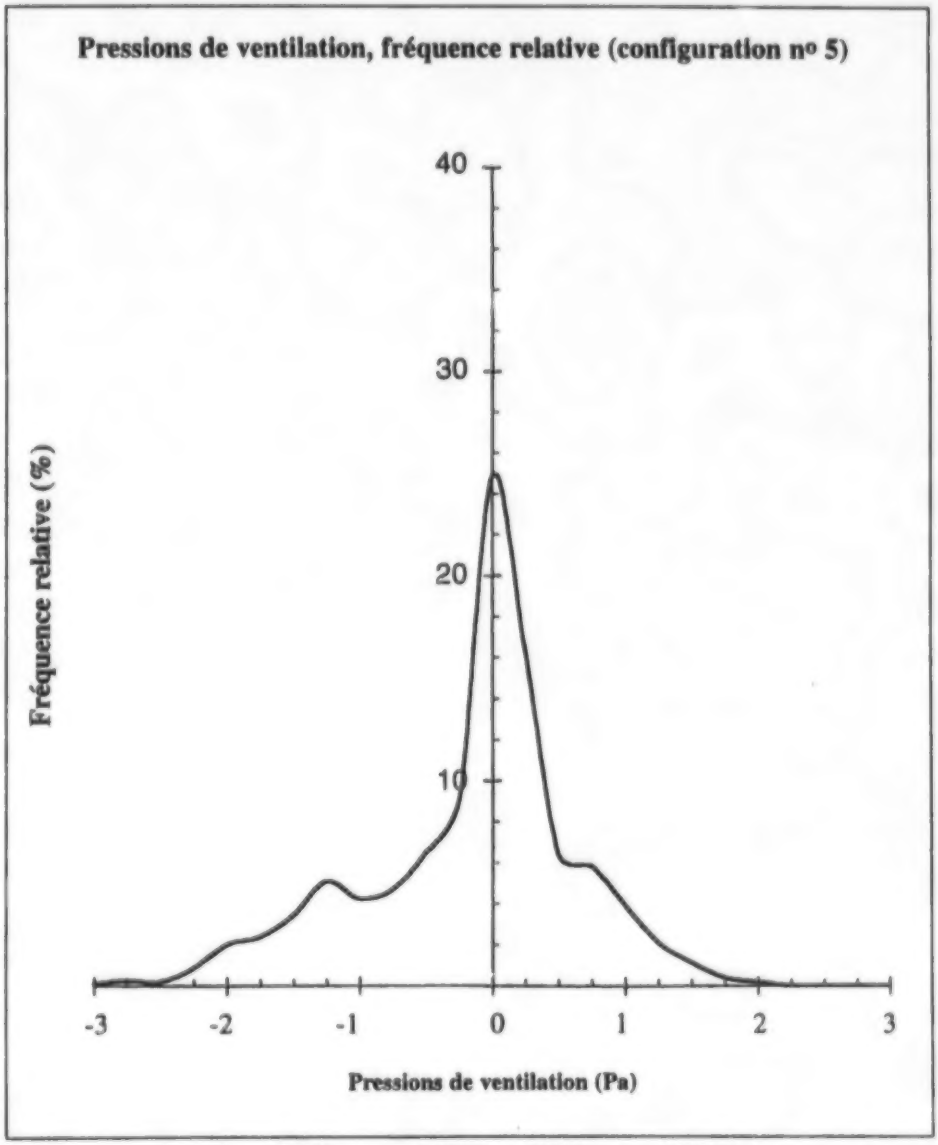


	VENTmoy	VENTve	VENTmax	VENTmin
Moyenne	-0,262	0,483	1,792	-2,863
Valeur efficace	0,388	0,456	1,727	2,908
Max.	0,770	3,026	9,880	0,010
Min.	-2,230	0,020	0,000	-16,060
Nombre :	507			

Pressions de ventilation, fréquence relative (configuration nº 4)



	VENTmoy	VENTve	VENTmax	VENTmin
Moyenne	-0,053	0,542	2,715	-2,506
Valeur efficace	0,274	0,319	2,055	1,651
Max.	0,750	1,723	10,270	-0,270
Min.	-0,860	0,041	-0,010	-8,770
Nombre :	421			



	VENTmoy	VENTve	VENTmax	VENTmin
Moyenne	-0,272	1,820	6,676	-8,098
Valeur efficace	0,797	1,558	4,522	6,454
Max.	1,850	8,662	12,480	-0,070
Min.	-3,000	0,027	-0,450	-17,380
Nombre :	1 047			